

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung, Zielstellung und Arbeitshypothesen</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>5</b>
2.1	Grundwasserdynamik in Flußauen	5
2.2	Grundwasserbeschaffenheit	8
2.3	Stoffumwandlungen	9
<b>3</b>	<b>Untersuchungsmethodik</b>	<b>13</b>
3.1	Untersuchungsgebiete und Recherchen	13
3.2	Felduntersuchungen	16
3.3	Laboruntersuchungen	24
3.3.1	Grund- und Oberflächenwasser	24
3.3.2	Bodenchemische Untersuchungen	25
3.3.3	Bodenphysikalische Untersuchungen	26
3.3.4	Bodenbiologische Untersuchungen	26
3.3.5	Batch-Versuche	27
3.3.6	Säulendurchlaufversuche	29
3.4	Modellierungen	32
3.4.1	Programmsystem MINIHO	32
3.4.2	Hydrogeologisches Strukturmodell	34
3.4.3	Modellparameter	35
3.4.4	Innere und äußere Randbedingungen	38
3.4.5	Grundwasserneubildung	38
3.4.6	Modellierung der Abflußkomponenten (AKWA-M)	42
3.4.7	Eichung des Grundwassermodells	45
	3.4.7.1 Stationäre Eichung und Bewertung der Wasserstände	45
	3.4.7.2 Instationäre Eichung	47
3.4.8	Berechnungsszenarien	48
3.5	Zusammenfassung der Untersuchungsmethodik	50
<b>4</b>	<b>Untersuchungsergebnisse</b>	<b>51</b>
4.1	Geologie der Untersuchungsgebiete	51
4.2	Grundwasserdynamik	59
4.2.1	Ist-Zustand	59
4.2.2	Modellierungsergebnisse und Prognose der Entwicklungsalternativen	72
	4.2.2.1 Modellierungsergebnisse zur Grundwasserdynamik des Ist-Zustandes	72
	4.2.2.2 Modellierungsergebnisse zur Entwicklungsalternative 2	74
	4.2.2.3 Modellierungsergebnisse zur Entwicklungsalternative 3	76
	4.2.2.4 Modellierungsergebnisse zur Entwicklungsalternative 4	76

4.2.2.5	Modellierungsergebnisse zu den Entwicklungsalternativen 5 und 6	78
4.3	Gewässerbeschaffenheit	80
4.3.1	Räumliche Differenzierung	80
4.3.1.1	Geogene Verhältnisse	80
4.3.1.2	Anthropogene Einflüsse	85
4.3.2	Zeitliche Entwicklung der Beschaffenheit	97
4.3.3	Stoffbilanzmodell	100
4.4	Stoffumwandlungsprozesse	104
4.4.1	Nitrat-Reduktion	104
4.4.2	Sulfat-Reduktion	106
4.4.3	Übertragung der Ergebnisse auf das Feld	110
4.5	Zwischenzusammenfassung der Untersuchungsergebnisse	113
<b>5</b>	<b>Bewertung der Entwicklungsalternativen und Übertragung auf den Unstrutraum</b>	<b>115</b>
5.1	Darstellung der Entwicklungsalternativen	115
5.1.1	Entwicklungsalternativen 1 und 2	115
5.1.2	Entwicklungsalternative 3	116
5.1.3	Entwicklungsalternative 4	116
5.1.4	Entwicklungsalternativen 5 und 6	117
5.2	Kriterien der Bewertung	117
5.3	Diskussion der Ergebnisse - Bewertung der Entwicklungsalternativen	118
5.3.1	Entwicklungsalternativen 1 - 3	118
5.3.2	Entwicklungsalternativen 4 - 6	121
5.4	Übertragung der Ergebnisse auf weitere Abschnitte des Unstrutraumes	123
5.5	Handlungsmatrix für Revitalisierungsmaßnahmen aus Sicht der Grundwasserhydrologie und -beschaffenheit	124
5.6	Zwischenzusammenfassung	127
<b>6</b>	<b>Ausblick und Weitergehender Forschungsbedarf</b>	<b>129</b>
6.1	Übertragung der Methodik für die Planung von Revitalisierungsmaßnahmen	129
6.1.1	Übertragung auf das Unstrut-Gebiet	129
6.1.2	Übertragung auf das Elbe-Einzugsgebiet	130
6.2	Weitergehender Forschungsbedarf	130
6.2.1	Forschungsbedarf im Bereich des Unstruttales	130
6.2.2	Forschungsbedarf zu allgemeinen Fragestellungen	131
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>132</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1-1:	Bearbeitungskonzept Teilprojekt "Grundwasserdynamik".....	2
Abb. 2.1-1:	Flußauen und ihre Einzugsgebiete.....	6
Abb. 2.1-2:	Wasserströme der Speisungs- und Entlastungsgebiete;.....	7
Abb. 2.3-1:	Abbaukinetiken .....	11
Abb. 3.1-1:	Untersuchungsflächen der Teilprojekte 1 - 3.....	13
Abb. 3.2-1:	Elektrische Sondierspitze System FUGRO .....	17
Abb. 3.2-2:	Lage der Drucksondierungen im Altengotternschen Ried .....	17
Abb. 3.2-3:	Grundwassersammler in Drucksondierloch.....	18
Abb. 3.2-4:	Probennahme an Grundwassersammlern .....	23
Abb. 3.3-1:	Batch Versuche .....	29
Abb. 3.3-2:	Aufbau der Säulenversuchsanlage .....	30
Abb. 3.3-3:	Säule mit Probennahmeport.....	31
Abb. 3.3-4:	Probennahmeport in der Säule.....	31
Abb. 3.4-1:	Diskretisierungsschema MINIHO (vertikal).....	33
Abb. 3.4-2:	Hydrogeologisches Strukturmodell (Ausschnitt).....	35
Abb. 3.4-3:	Nomogramm zur Abschätzung des T-Wertes .....	36
Abb. 3.4-4:	Bohrgut der Bohrung Agt 2/97.....	37
Abb. 3.4-5:	Beziehung zwischen Niederschlag und Grundwasserneubildung .....	39
Abb. 3.4-6:	Grundwasserneubildungsganglinien in der Aue .....	40
Abb. 3.4-7:	Vergleich der Grundwasserneubildungsberechnungen.....	41
Abb. 3.4-8:	Wasserhaushaltsgrößen im Einzugsgebiet des Nordmars (Speisungsgebiet).....	42
Abb. 3.4-9:	Lage des Wehres Nordmar zwischen Großengottern und Schönstedt .....	43
Abb. 3.4-10:	Vergleich des gemessenen Abflusses mit den simulierten Abflußmengen .....	44
Abb. 3.4-11:	Ergebnis der stationären Modelleichung .....	46
Abb. 3.4-12:	Mittelwertentwicklung der gemessenen Grundwasserstände.....	46
Abb. 3.4-13:	Modellganglinien der Grundwasserneubildung in Unstrut-Aue und Speisungsgebiet.....	47
Abb. 3.4-14:	Instationäre Modelleichung an Meßstellen der Aue und des Speisungsgebietes .....	48
Abb. 4.1-1:	Geologische Übersichtskarte mit Untersuchungsgebieten.....	51
Abb. 4.1-2:	Mächtigkeitsübersicht des Unteren Gipskeupers in Thüringen .....	53
Abb. 4.1-3:	Generalprofil des Auensedimentes (Altengotternsches Ried) .....	54
Abb. 4.1-4:	Geologischer Schnitt durch das Unstruttal zwischen Bad Langensalza und Mühlhausen.....	55
Abb. 4.1-5:	Geologischer Schnitt durch das Untersuchungsgebiet Sömmerda.....	57
Abb. 4.1-6:	Geologischer Schnitt durch das Unstruttal bei Artern .....	58
Abb. 4.2-1:	Flurabstände der Grundwasserdruckfläche im Großengotternschen Ried (Mai 99).....	61
Abb. 4.2-2:	Ganglinien der Keupermeßstellen im Nordosten des Untersuchungsgebietes .....	61
Abb. 4.2-3:	Ganglinienvergleich Keuper - rechts und links der Unstrut.....	62
Abb. 4.2-4:	Ganglinien des südwestlichen Untersuchungsgebietes .....	64
Abb. 4.2-5:	Profile der Grundwasserhöhe im Altengotternschen Ried.....	66
Abb. 4.2-6:	Grundwasserstandsganglinien in der Aue und Grundwasserneubildung .....	67
Abb. 4.2-7:	Korrelationskoeffizienten der Grundwasserstandsganglinien zur Unstrut.....	68
Abb. 4.2-8:	Ganglinienkorrelation im Altengotternschen Ried .....	68
Abb. 4.2-9:	Ganglinienvergleich Unstrut, Keuper und Aue.....	69
Abb. 4.2-10:	Vergleich der langjährigen Monatsmittel mit den Monatsmittelwerten Staatlicher Grundwassermeßstellen im Speisungs- und Entlastungsgebiet .....	70
Abb. 4.2-11:	Ergebnis der instationären Berechnung des Ist-Zustandes.....	72
Abb. 4.2-12:	Verlauf des Unstrut-Hochwassers Februar 1946 .....	73
Abb. 4.2-13:	Wirkung eines Hochwasser HQ100 auf die Grundwasserstände in der Aue im Ist-Zustand .....	74

Abb. 4.2-14: Unterschied zwischen gemessenen Grundwasserflurabständen und modellierten Druckspiegelhöhen .....	75
Abb. 4.2-15: Berechnete Druckspiegelhöhen und gemessene Grundwasserflurabstände im Altengotternschen Ried (EA 2 und 3) .....	75
Abb. 4.2-16: Berechnete Druckspiegelhöhen der EA 4 und Variante 4.1 im Altengotternschen Ried.....	77
Abb. 4.2-17: Hochwasser HQ100 und Grundwasserstände in der Aue in der EA 4.....	78
Abb. 4.2-18: Abflußrichtungen des austretenden Grundwassers im Großengotternschen Ried.....	79
Abb. 4.2-19: Berechnete Druckspiegelhöhen der EA 5 und 6 im Altengotternschen Ried .....	79
Abb. 4.3-1: Hydrochemie des Grundwassers.....	81
Abb. 4.3-2: Hydrochemie der Oberflächengewässer .....	82
Abb. 4.3-3: Geogene Hydrochemie in Untersuchungsgebiet Sömmerda.....	83
Abb. 4.3-4: Elektrische Leitfähigkeiten in Oberflächengewässern bei Sömmerda .....	84
Abb. 4.3-5: Nitratverteilung im Grundwasser.....	86
Abb. 4.3-6: Nitrate im Speisungsgebiet.....	86
Abb. 4.3-7: Nitrate im Nord-Ost-Bereich des Untersuchungsgebietes .....	87
Abb. 4.3-8: Nitrat-Konzentrationen des Grundwassers im Gebiet Sömmerda; .....	88
Abb. 4.3-9: Nitratverteilung in Grundwassersammlern des Altengotternschen Rieds .....	89
Abb. 4.3-10: Nitrat-N im Auensediment des Altengotternschen Rieds. ....	90
Abb. 4.3-11: Nitratgehalte in den GW-Sammlern (summarisch).....	91
Abb. 4.3-12: Nitrat im Altengotternschen Kanal .....	93
Abb. 4.3-13: Nitratgehalte der Unstrut bei Thamsbrück.....	94
Abb. 4.3-14: Phosphatgehalte in Oberflächengewässern.....	95
Abb. 4.3-15: Nitratganglinien in Speisungsgebiet und östlichem Untersuchungsgebiet.....	97
Abb. 4.3-16: Mittelwerte und Streubreiten Nitrat (ausgewählte Meßstellen der Speisungsgebiete).....	98
Abb. 4.3-17: Nitratganglinien in Grundwassersammlern.....	99
Abb. 4.3-18: Mittelwerte und Streubreiten Nitrat in den Grundwassersammlern.....	100
Abb. 4.3-19: Stoffbilanzmodell Unstrutaue.....	101
Abb. 4.4-1: Nitratganglinien der Batch-Versuche .....	105
Abb. 4.4-2: Nitrat und Ammonium in Batch-Versuch 3 .....	105
Abb. 4.4-3: Sulfat in Batch-Versuch 3.....	107
Abb. 4.4-4: Nitrat und Sulfat im Säulenversuch .....	109
Abb. 4.4-5: Vergleich der Ergebnisse Batch-Versuch und Feld .....	110
Abb. 4.4-6: Korrelation DOC / NO <sub>3</sub> in Grundwassersammlerproben.....	111
Abb. 4.4-7: DOC im Auensediment des Altengotternschen Rieds .....	112
Abb. 4.4-8: Sulfatreduktion in Grundwassersammler II/3 .....	112
Abb. 5.3-1: Beschaffenheitsbeeinflussung der Oberflächengewässer durch basalen Grundwasserzutritt.....	120
Abb. 5.5-1: Einflußfaktoren auf das System von Flußauen .....	125
Abb. 5.5-2: Handlungs-Wirkungs-Matrix für Revitalisierungsmaßnahmen .....	126

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.2-1:	Relevante Stofffrachten in Flußeinzugsgebieten.....	8
Tabelle 2.3-1:	Mögliche Stoffumwandlungen.....	9
Tabelle 3.1-1:	Eckkoordinaten der Untersuchungsgebiete.....	14
Tabelle 3.1-2:	Anzahl und Art der ausgewerteten geologischen Aufschlüsse.....	15
Tabelle 3.2-1:	Lage- und Ausbaudaten der abgeteufte Grundwassermeßstellen.....	19
Tabelle 3.2-2:	Lage und Ausbau der Flachpegel.....	20
Tabelle 3.2-3:	Lage der Meßpunkte der Durchflußmessungen.....	20
Tabelle 3.2-4:	Stichtagsmessungen mit Anzahl der Meßpunkte.....	21
Tabelle 3.3-1:	Analytikumfang an Grund- und Oberflächenwassermeßstellen.....	24
Tabelle 3.3-2:	Pflanzenschutzmittel-Untersuchungen.....	25
Tabelle 3.3-3:	Untersuchungsprogramme der Bodenproben.....	26
Tabelle 3.3-4:	Versuchskonfiguration Batch-Versuche.....	28
Tabelle 3.3-5:	Konzentration und Herkunft des Input-Wassers des Säulenversuches.....	30
Tabelle 3.4-1:	Modellschichten.....	35
Tabelle 3.4-2:	Hydraulische Randbedingungen der Berechnungsszenarien.....	49
Tabelle 4.1-1:	Stratigraphische Tabelle der Untersuchungsgebiete.....	56
Tabelle 4.2-1:	Korrelationskoeffizienten zwischen Meßstelle Agt 3/97 und weiterer Keuper- Meßstellen.....	62
Tabelle 4.2-2:	Korrelationskoeffizienten zwischen Keuper-Meßstellen unterschiedlicher Strömungsregime.....	63
Tabelle 4.2-3:	Korrelationsmatrix der Meßstellen zwischen Höngeda und Großengottern.....	63
Tabelle 4.2-4:	Korrelationsmatrix der Meßstellen im südwestlichen Untersuchungsgebiet.....	64
Tabelle 4.3-1:	Dedektierte Substanten des PSM-Screenings.....	96
Tabelle 4.3-2:	Rechengrößen des Stoffbilanzmodells.....	101
Tabelle 4.4-1:	Kinetische Parameter des Batch-Versuches 3.....	106
Tabelle 4.4-2:	Desulfurikanten im Auensediment.....	108
Tabelle 4.4-3:	Denitrifikanten im Säulensubstrat.....	108
Tabelle 5.2-1:	Kriterien für die Bewertung der Entwicklungsalternativen aus Sicht der Grundwasserdynamik und -beschaffenheit.....	118

## Abkürzungsverzeichnis

In dem Abkürzungsverzeichnis werden Abkürzungen erläutert, die nicht in Abbildungs- und Tabellenunterschriften oder in Formeln erklärt sind. Bohrbezeichnungen sind nicht ebenfalls nicht im Abkürzungsverzeichnis aufgeführt.

ANP	Agrarraum-Nutzungs- und Pflegeplan
C	Konzentration
DN	Nenndurchmesser
DOC	Gelöster organischer Kohlenstoff
DS	Drucksondierung
F	Fracht
FP	Flachpegel
GOK	Geländeoberkante
GW	Grundwasser
GWN	Grundwasserneubildung
GWS	Grundwassersammler
HQ	Bemessungs-Hochwasser (mengenbezogen) (Index: statist. Wiederkehrintervall)
HW	Hochwert (Gauß-Krüger-Bessel)
kN	Kilo-Newton
m ü. NN	Höhe in Meter über Normal-Null
MW	Mittelwasser
oh	oberhalb
PSM	Pflanzenschutzmittel
Q	Abflußmenge
RB	Randbedingung
RW	Rechtswert (Gauß-Krüger-Bessel)
TLG	Thüringer Landesanstalt für Geologie (Sitz: Weimar)
TLL	Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (Sitz: Jena)
TLU	Thüringer Landesanstalt für Umwelt (Sitz Jena)
TP	Teilprojekt
UG	Untersuchungsgebiet
uh	unterhalb

## Glossar

AKWA-M	Hydrologisches Abflußmodell kleinerer und mittlerer Einzugsgebiete auf dem Prinzip der Speicherkaskaden (s. MÜNCH, 1994)
Altarm	hat bei Mittelwasser andauernden einseitigen oder beidseitigen - allerdings nicht durchströmten - Anschluß an das Flußwasser (nach JÜRGING 1998)
BAT-Probennahme	Schwedisches Probennahmesystem mittels headspace-Röhrchen, das in Druck- und Rammsondierungen eingesetzt werden kann. Fand Verwendung zur Probennahme im Auensediment während der Drucksondierungen.
DIFGA	Hydrologisches Berechnungsmodell zur Differenzenganglinienanalyse (SCHWARZE, 1985)
Flachpegel	Grundwasserbeobachtungsrohr, 1“ Durchmesser, zur Beobachtung oberflächennahen Grundwassers (s. S. 19)
GEOFEM	Berechnungsprogramm der langjährigen Grundwasserneubildung für Festgesteinseinzugsgebiete (s. ZIEGLER U. GABRIEL, 1975)
Grundwassersammler	Im Boden eingebauter Filter an einem Schlauch, der sich mittels Vakuumpumpe beproben läßt (Beschreibung s. S. 18 u. 23)
MINIHO	Grundwassermodellierungsprogramm mit Finiten Differenzen (s. GUTT, 1998)
MOSTAP	Liner-Probennahme-System für ungestörte Bodenproben, das in Drucksondierungen eingesetzt werden kann. Fand Verwendung zur Probennahme im Auensediment während der Drucksondierungen.
Totarm	Ehemalige Flußschlinge, die andauernd sowohl oberirdisch als auch unterirdisch von dem Flußwasser abgekoppelt ist. (nach JÜRGING 1998)

## Anlagenverzeichnis

Anl.Nr. I/...	Inhalt / Titel
1	Übersicht über das Untersuchungsgebiet
2-1	Untersuchungsgebiet mit Lage der Meßstellen
2-2	Untersuchungsfläche A mit Lage der Meßstellen
2-3	Meßstellenliste
2-4	Ergebnisse der Durchflußmessungen
2-5	Ergebnisse der Stichtagsmessungen
2-6	Liste der Grundwasserprobennahmen
3-1	Modellkarte - Diskretisierung und Randbedingungen
3-2	Modellkarte - Grundwasserneubildung (GEOFEM)
3-3.1	Verbreitung Modellschicht „Verkarsteter Gipskeuper“
3-3.2	Verbreitung Modellschicht „Pleistozän“
3-3.3	Verbreitung Modellschicht „Holozän-1“
3-3.3	Verbreitung Modellschicht „Holozän-2 (Torf)“
3-3.3	Verbreitung Modellschicht „Holozän-3“
3-4	Digitales Höhenmodell
3-5	Modelleichung - Vergleich gemessen/berechnet
4-1	Lithofaziesseinheiten
4-2.1	Hydroisohypsenplan - Aug. 98
4-2.2	Druckspiegelhöhen - Aug. 98
4-3.1	Hydroisohypsenplan - März 99
4-3.2	Druckspiegelhöhen - März. 99
4-4.0	Aufschlußkarte mit Schnittlinien
4-4.1	Geologischer Schnitt 1
4-4.2	Geologischer Schnitt 2
4-4.3	Geologischer Schnitt 3
4-4.4	Geologischer Schnitt 4
4-5	Bohrprofile der Drucksondierungen
4-6	Bohrprofile der Grundwassermeßstellen



4-7	Drucksondier-Profil II, Altengotternsches Ried
5-1	Druckspiegelhöhen - EA 1-3 - Diffenzen zu GOK
5-2	Druckspiegelhöhen - Var. 3.1 - Diffenzen zu GOK
5-2a	Var. 3.1 Differenzen zu EA 3
5-3	Druckspiegelhöhen - Var. 3.2 - Diffenzen zu GOK
5-3a	Modellkarte - Var. 3.2 Differenzen zu EA 3
5-4	Druckspiegelhöhen - EA 4 - Diffenzen zu GOK
5-4a	Modellkarte - EA 4 - Differenzen zu EA 1
5-5	Druckspiegelhöhen - Var. 4.1 - Diffenzen zu GOK
5-5a	Modellkarte - Var. 4.1 Differenzen zu EA 4
5-6	Druckspiegelhöhen - EA 5,6 - Diffenzen zu GOK
5-6a	Modellkarte - VaEA 5,6 - Differenzen zu EA 1

## **Anhang**

A 1	Ergebnisse der PSM-Analytik
A 3	Ergebnisse der Berechnung mit AKWA-M des Teileinzugsgebietes Nordmar

## 1 Einleitung, Zielstellung und Arbeitshypothesen

Die seit 1996 eingerichtete Forschungskonzeption "Ökologische Forschung in der Stromlandschaft Elbe" hat die Gewässerlandschaft des Einzugsgebietes der Elbe zum Forschungsgegenstand. Hintergrund ist die Tatsache, daß "naturnahe Flüsse zur Seltenheit geworden sind und bis heute in die Dynamik von Flüssen und Auen eingegriffen wird" (BMBF 1995).

Durch verschiedenartige Nutzungen in der Aue haben sich die zeitliche und räumliche Dynamik der Auen geändert und damit die naturnahen funktionalen Beziehungen stark beeinträchtigt. So sind folgende Auswirkungen zu verzeichnen (BMBF 1995):

- Verarmung an naturnahen Strukturen und Lebensräumen, die mit großen Verlusten von landschaftstypischen Pflanzen- und Tierarten verbunden sind,
- Einschränkung der Ausbreitungswege von Organismen (Verinselung) mit der Folge genetischer Verarmung von Tier- und Pflanzenpopulationen,
- Grundwasserabsenkungen und damit Austrocknung der Böden als Folge der Melioration, Flußbegradigung, -vertiefung und Sohlenerosion,
- Einbußen der biologischen Selbstreinigung der Flüsse und
- Verschärfung der Hochwassergefahren durch Einengung der natürlichen Retentionsräume.

Diese Beschreibung der Auswirkungen von anthropogenen Eingriffen in das Auenökosystem trifft in vollem Maße auch auf die Unstrut und ihre Auen zu.

Die Unstrut, als eines der größeren Thüringer Gewässer und zentraler Vorfluter des Thüringer Beckens wurde ab dem Jahr 1993 auf Grund des massiven Gewässerausbaus in die wasserwirtschaftlichen Planungen einbezogen. In den Jahren 1993 bis 1996 wurden Konzepte erarbeitet, in denen die aus wasserwirtschaftlicher, wasserbaulicher und naturschutzfachlicher Sicht mögliche Entwicklung der Unstrut skizziert wurde (WITTKOWSKI 1995).

Dabei standen folgende Ziele im Vordergrund (WEBEL u.a. 1999):

- Wiederherstellung der funktionalen Einheit von Gewässer und Aue,
- Förderung einer naturraumtypischen Gewässer- und Überflutungsdynamik,
- Wiederherstellung eines naturnahen Gewässerzustandes,
- Verbesserung des Hochwasserschutzes durch Reaktivierung von Retentionsflächen,
- Entwicklung gewässer- und auentypischer Biotopstrukturen und damit Verbesserung der Lebensbedingungen auentypischer Tier- und Pflanzenarten,
- Erhöhung der Strukturvielfalt der Landschaft, Verbesserung des Biotopverbundes.

Das Forschungsvorhaben "Revitalisierung Unstrut- und Saale" sollte dabei der wissenschaftlichen Begleitung der "Leitidee zur Revitalisierung der Unstrut- und Saale" dienen.

Das Ziel des BMBF-Projektes "Unstrut-Revitalisierung" war somit, verschiedene biotische und abiotische Standortverhältnisse im Prozeß der Revitalisierung in ihren Wechselwirkungen zueinander zu untersuchen.

Zu dem Forschungsverbund unter Leitung der Thüringer Landesanstalt für Umwelt gehörten folgende Partner:

- Dresdner Grundwasserforschungszentrum e.V. (TP 1 - Grundwasserdynamik),
- Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TP 2 - Stoffflüsse in der ungesättigten Zone; TP 4 - EULANU),
- Institut für Ökologie der Friedrich-Schiller-Universität Jena (TP 3 - Ökologische Bewertung),
- Büro für Ökonomie, Naturschutz und Landwirtschaft (BÖNL) und Institut für Wirtschaftswissenschaften der Friedrich-Schiller-Universität Jena (TP 5 - volkswirtschaftliche Bewertung),
- Thüringer Landesanstalt für Umwelt (TP 6 - GIS; TP 7 - Gewässer- und Auenentwicklung).

Ein Gegenstand des Teilprojektes "Grundwasserdynamik" war es, die hydraulischen Verhältnisse des Grundwassers in der Unstrut-Aue und deren Einzugsgebiet im Gebiet ausgewählter Referenzflächen zu betrachten.

Durch ein geeignetes Grundwassermodell waren der Wasserhaushalt und die Grundwasserdynamik im Auenbereich und dem Einzugsgebiet darzustellen.

In das Grundwasserleitermodell waren die Beschaffenheitsverhältnisse zu integrieren, die im Untersuchungsgebiet einerseits verschiedenen geogenen Einflüssen unterliegen (Aufbau des liegenden Untergrundes der Auesedimente), andererseits aber durch intensiv betriebene Landwirtschaft einem starken anthropogenen Einfluß ausgesetzt sind.

Die Bearbeitung des Teilprojektes "Grundwasserdynamik" beinhaltet somit die Komponenten Grundwasserdynamik und Grundwasserbeschaffenheit.

Die Abbildung 1.1-1 verdeutlicht das Bearbeitungskonzept.

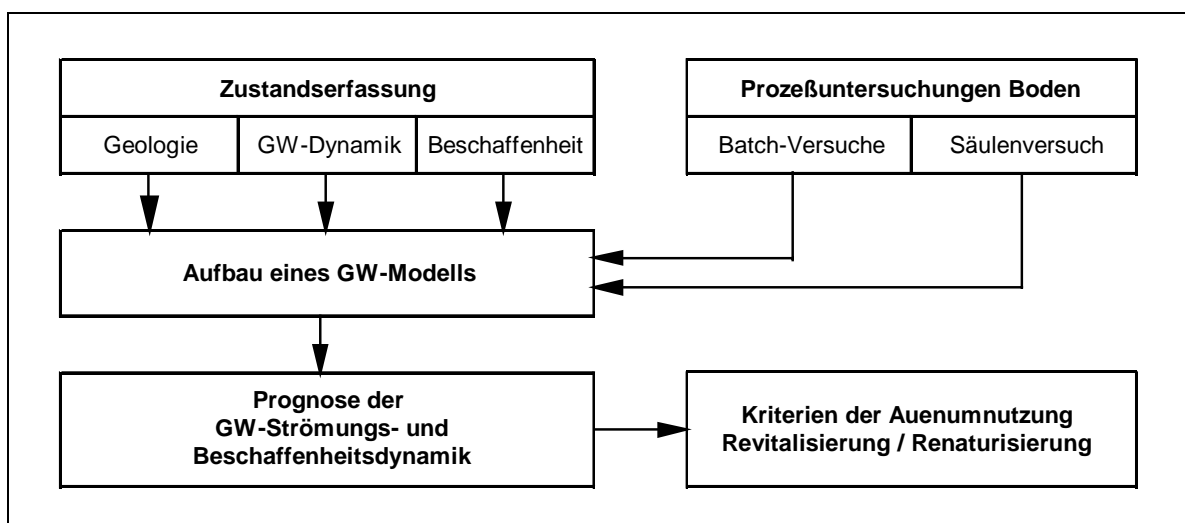


Abb. 1.1-1: Bearbeitungskonzept Teilprojekt "Grundwasserdynamik"

Ausgangspunkt der Untersuchungen innerhalb des Teilprojektes I ist die Tatsache, daß Flußauen natürliche Entlastungsgebiete von unterirdischen Einzugsgebieten darstellen (s. Kap. 2.1).

Inhalt des Teilprojektes I - Grundwasserdynamik - ist die Untersuchung der Wechselwirkungen hinsichtlich Grundwasserdynamik und -beschaffenheit zwischen den Speisungsgebieten und dem Entlastungsgebiet, der Unstrutau.

Exemplarisch werden die Untersuchungen an einem Abschnitt des Oberlaufs der Unstrut zwischen Bad Langensalza und Mühlhausen vorgenommen, in dem Bereich, wo vom Teilprojekt II - Stoffflüsse - durch Lysimeterstationen Untersuchungen der Bodenwasser-(Sickerwasser-)beschaffenheit vorgenommen werden.

Die **Fragestellungen** im Hinblick auf das Gesamtprojekt beinhalten im wesentlichen zwei Schwerpunkte:

- Erfassung des Wasserhaushaltes (**hydraulische Komponente**) im Untersuchungsgebiet und Einbeziehung der Untersuchungsflächen in ein großräumiges Grundwassermodell,
- Erfassung der Wechselwirkungen, die zwischen Grundwasser und Oberflächengewässer und zwischen Auengrundwasser und tieferem Grundwasser für die Entwicklung der umgenutzten Aue relevant sind.
- Erfassung der Stoffbilanz (**Beschaffenheitskomponente**) durch Gegenüberstellung der Einträge mit Nährstoffen aus dem Hinterland mit den veränderten Austrägen aus dem ungenutzten Auenstreifen.
- Erfassung der Stoffumwandlungsprozesse innerhalb der ufernahen Aue im wassergesättigten Bereich.
- Untersuchungen an dem ungesättigten Boden sollen zu einem Abgleich sowohl mit den Ergebnissen aus dem Teilprojekt "Sickerwasser" als auch mit den Untersuchungsergebnissen aus dem wassergesättigten Bereich führen.

Im Ergebnis der Untersuchungen waren innerhalb des Verbundprojektes

- die von den Entwicklungsalternativen ausgehenden Auswirkungen auf Grundwasserdynamik und -beschaffenheit zu formulieren und
- Empfehlungen für die Optimierung der Entwicklungsalternativen aus geohydraulischer Sicht abzugeben.

Bei der Bearbeitung wurde von folgenden projektspezifischen **Arbeitshypothesen** ausgegangen:

- 1) Die Unstrutau ist das Entlastungsgebiet für die regionale Grundwasserströmung. Der Grundwasserstrom ist in der Aue vertikal aufwärts gerichtet. Stoffe aus den aufernen Höhenlagen werden über die liegenden Auensedimente ausgetragen. Grundsätzlich gilt es, zwei typische Stoffströme zu unterscheiden (s. Abb. 2.1-1):

- (1) Stoffstrom vom Speisungsgebiet über das Transitgebiet (z.T. verkarsteter Gipskeuper) zum Entlastungsgebiet (d.h. die Aue mit der Unstrut und den Dränagen),
  - (2) Stoffstrom vom Ackerboden der Aue über den Auenunterboden zur meliorativen Dränung.
- 2) Der vertikal aufsteigende Grundwasserstrom wird in der Aue durch technisch/meliorative Elemente abgefangen und unterbrochen (Rohr- und Grabendränung). Eine wirksame Revitalisierung der Unstrutauere beinhaltet deshalb auch Rücknahme bzw. Rückbau der Meliorationsanlagen. Von zentraler Bedeutung ist dabei die Revitalisierung der Unstrut selbst und die Festlegung von Zielwasserspiegellagen. Den Auengrundwasserspiegel gilt es vor allem durch diese Maßnahmen wieder anzuheben.
- 3) Für die Stoffwandlung bei der Untergrundpassage des Grundwassers kommt den tieferen Auensedimenten besondere Bedeutung zu. Bei deren vertikal-aufwärts gerichteter Durchströmung wird das Grundwasser biochemisch reduziert und es kommt zu einem bedeutenden  $\text{NO}_3^-$ - und  $\text{SO}_4^-$ -Abbau. Auch mit einem PSM-Abbau kann gerechnet werden. Die Quellen für die Beladung des Grundwasserstroms befinden sich dabei zum Teil weit außerhalb der Aue, in den Grundwasserspeisungsgebieten, auf den die Aue begleitenden, vorwiegend ackerbaulich genutzten Hochflächen. Die Revitalisierung der Unstrutauere zielt deshalb vor allem auf Maßnahmen ab, die der Rücknahme der Grundwasserabsenkung in der Aue dienen, um der Aue ihre natürliche Potenz zum reduktiven Stoffabbau in den Auesedimenten zurückzugeben.
- 4) Neben der erforderlichen Wiederherstellung der großflächig vertikal-aufwärts gerichteten Wasser- und Stoffflüsse (Rückbau von Meliorationssystemen der Dränung) sowie der Restriktionen der vertikal-abwärts gerichteten Stoffströme (Änderung der Flächennutzung (s. TP 2) sollten bei der Revitalisierung der Aue (z.B. durch Deichrückverlegung) auch auf die Gewährleistungen von angemessen breiten Uferstrandstreifen entlang der verbleibenden (nicht eingedeichten) Vorfluter geachtet werden, um horizontalen Stoffflüssen, die den Vorfluter mit partikulärer Stofffracht auf kürzestem Wege zugehen können, wirksam zu begegnen.

## 2 Grundlagen

Bei der Betrachtung der Prozeßzusammenhänge zwischen Speisungsgebiet und Entlastungsgebiet sind vier Komplexe zu betrachten, die in ihrem Zusammenhang in Abb. 2.1-2 dargestellt sind und im folgenden kurz beschrieben werden. Es handelt sich dabei um:

- Grundwasserdynamik (im Speisungs- und Entlastungsgebiet),
- Grundwasserbeschaffenheit und Stofftransport,
- Gesteinsbeschaffenheit,
- Stoffumwandlungsprozesse.

### 2.1 Grundwasserdynamik in Flußauen

Als Flußauen werden räumlich jene Talzonen bezeichnet, die innerhalb des Einflußbereiches von Hochwasser liegen. Die Aue endet dort, wo die flächenhafte Überflutung allenfalls episodisch oder gar nicht mehr auftritt. Auen sind somit Ökosysteme höheren Ranges, die aus dem Fließgewässersystem und den angrenzenden hochflutbeeinflussten Teillebensräumen bestehen (GEPP 1986).

Die Flußaue wird mit dieser Definition in erster Linie vom Flußlauf aus definiert. Daraus wird oftmals simplifizierend geschlossen, daß das Oberflächengewässer der bestimmende Faktor für die Grundwasserströmung im Talraum ist.

Die Grundwasserströmung in Flußauen wird jedoch von den *zwei* Faktoren

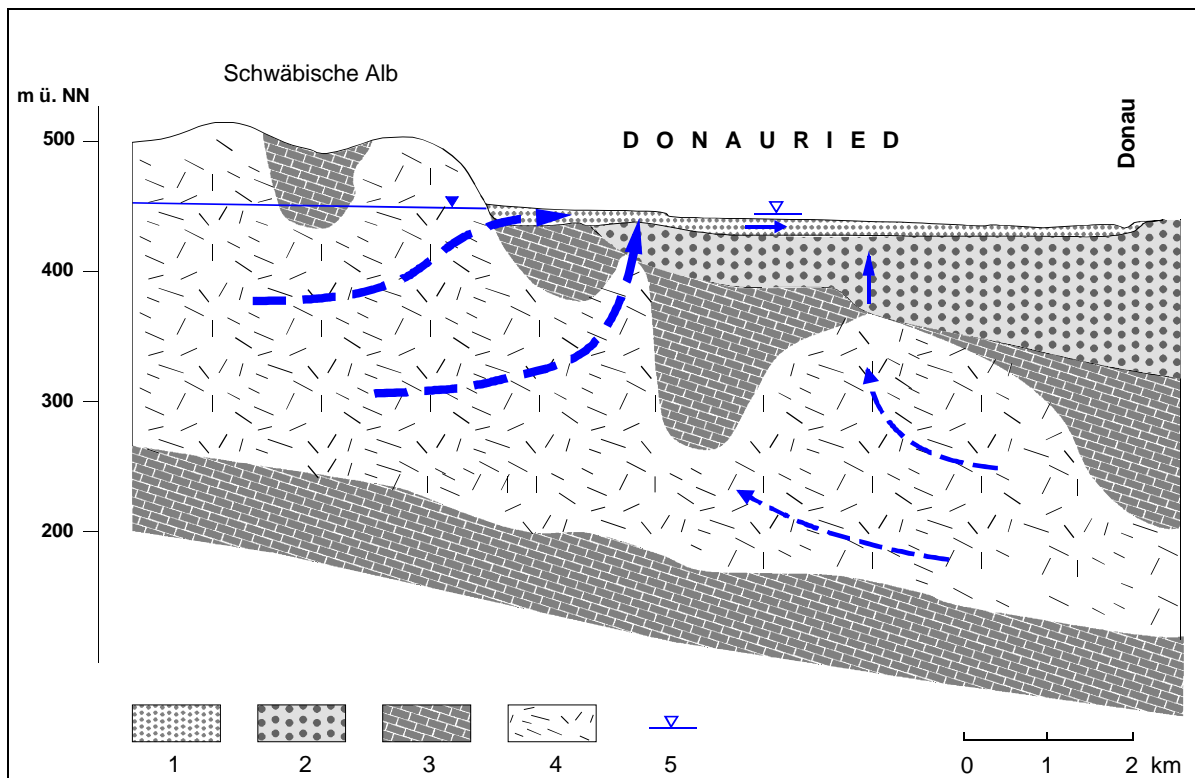
- Dynamik des Vorfluters *und*
- Dynamik des unterirdisch in den Talraum zuströmenden Grundwassers

beeinflußt, die sich gegenseitig in ihren Wirkungen überlagern:

In Anlehnung an BINDER U. WAGNER (1994) gehören deshalb zu den Grundlagen einer naturnahen Auengestaltung aus der Sicht der Geohydrologie folgende Aspekte:

- Auen müssen in ihrer Gestaltung den *regionalen Zusammenhängen zwischen Speisungsgebieten und Entlastungsgebieten* entsprechen,
- die Gewässersysteme in der Aue müssen eine *natürliche Entlastung* gewährleisten,
- landschaftstypische Eigenschaften des Gewässers sollen wiederhergestellt werden,
- das Gewässer selbst soll eine vielfältige Gewässerlandschaft gestalten.

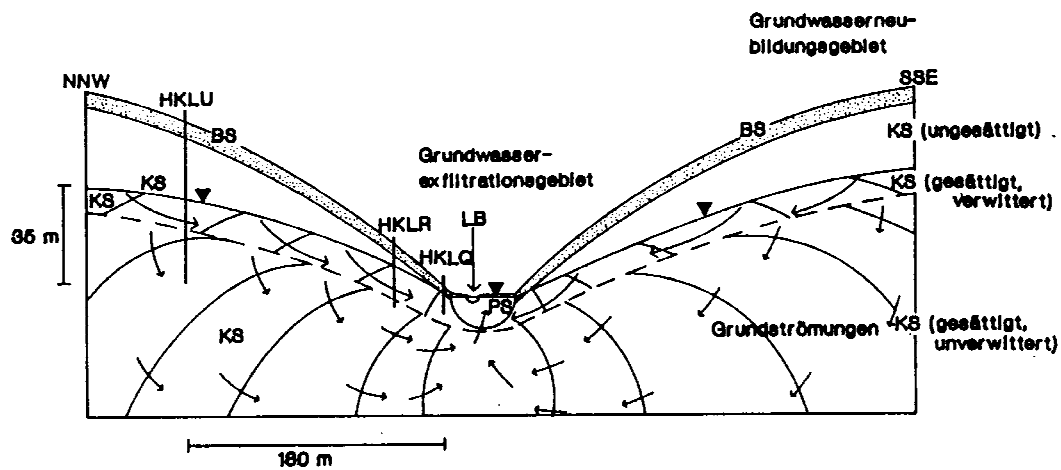
Damit wird für deren ökologische Beschreibung die Aue als wesentliches geohydraulisches *Element eines Flußeinzugsgebietes* betrachtet und die *Entlastungsfunktion* der Aue für den regionalen Grundwasserstrom als wesentliches Element berücksichtigt.



1 - quartäre Sande und Kiese, 2 - Molasse; 3 - Jura-Kalke, geschichtet; 4 - Massenkalke, z.T. verkarstet; 5 - Karstgrundwasser-Oberfläche, über Flur gespannt (artesisch)

a)

Quelle: BIERER et al. (1987)



b)

Quelle: SCHÖNIGER (1991)

**Abb. 2.1-1: Flußauen und ihre Einzugsgebiete.**

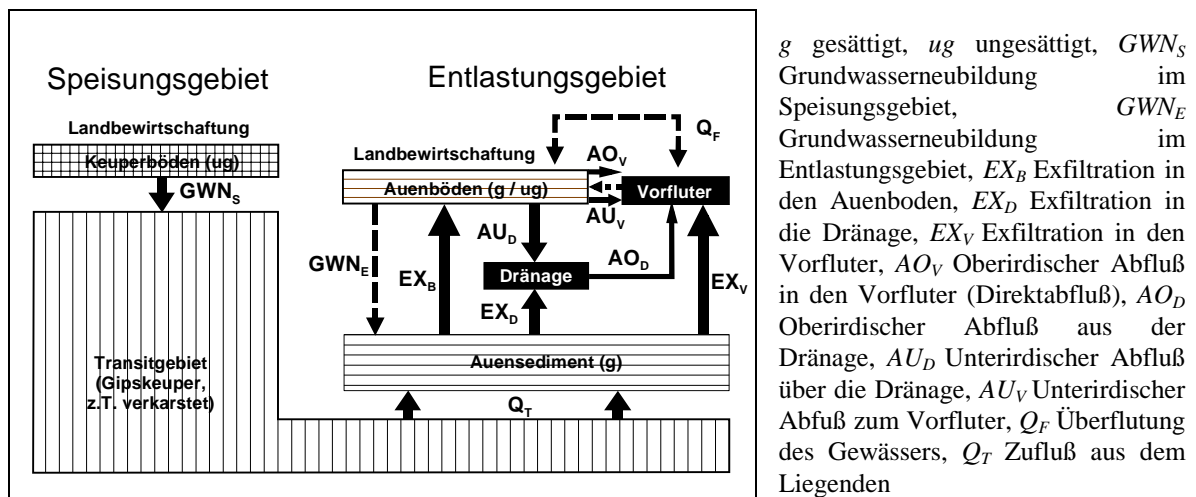
a) - Donauried; b) - Lange Bramke (Harz)

### *Auen als Elemente eines Flusseinzugsgebietes*

Die Definition der Aue als der Teil des Flußtales, der innerhalb einer definierten Hochwasserlinie liegt (s. BLAW 1996), kann nur als die flächige Projektion eines hydrogeologisch relevanten Raumes angesehen werden. Flußauen als die das Oberflächenwasser begleitende Landschaftselement sind hingegen immer als Teil des oberirdischen und unterirdischen Einzugsgebietes des Flusses zu betrachten. Das unterirdische Einzugsgebiet erstreckt sich sowohl in die Fläche als auch in die Tiefe des geologischen Raumes, wie dies an den Abbildungen 2.1-1 a) und b) deutlich wird. Die Speisungsgebiete für die Auen können dabei weit außerhalb des Flußtales liegen (Beispiel Donauried). In Mittelgebirgsregionen (Beispiel Lange Bramke) kommt es über die Klüfte des liegenden Festgesteins zum Zustrom in die Aue.

### *Auen als Entlastungsgebiete*

Flußauen sind unter natürlichen Zuständen von geringem Grundwasserflurabstand gekennzeichnet. So drückt die Bezeichnung "Ried" immer den ursprünglichen Charakter einer Sumpf- und Auenlandschaft aus (IVEN 1987). Dies hat zum einen seine Ursache in der Interaktion zwischen Fluß und Grundwasser. Einen entscheidenden Einfluß hat jedoch das Druckpotential des aus dem Liegenden zuströmenden Grundwassers auf die Oberflächennähe der Grundwasserstände der Auen. Durch dieses Druckpotential, das an der Basis der Talsedimente anliegt, kommt es zur aufsteigenden Grundwasserströmung in den Talsedimenten. Der Fluß als linienförmiges Entlastungselement nimmt im Taltiefsten Grundwasser auf.



**Abb. 2.1-2: Wasserströme der Speisungs- und Entlastungsgebiete;**

Aus den Zusammenhängen zwischen Aue und dem unterirdischen Einzugsgebiet lassen sich unterschiedliche Teilströme ableiten, wie sie in Abbildung 2.1-2 dargestellt sind. Die Einflußfaktoren wirken dabei auf die Grundwasserstände in der Aue sowohl direkt als auch indirekt. Zu den direkten Einflußfaktoren sind die Grundwasserneubildung im Entlastungsgebiet ( $GWN_E$ ), die Exfiltration aus dem Liegenden in die Auenböden ( $EX_B$ ) und das Überflutungsgeschehen des Gewässers ( $Q_F$ ) zu zählen, während die Grundwasserneubildung in den Speisungsgebieten ( $GWN_S$ ) nur indirekt wirkt. Der vertikal



aufsteigende Grundwasserstrom wird in der Aue mit zunehmend intensiverer Nutzung der Auenbereiche durch technisch-meliorative Elemente abgefangen und unterbrochen (Rohr- und Grabendränage), wodurch die natürlicherweise als Sumpfgebiete bekannten Auenbereiche zu Gebieten mit auenuntypisch großen Grundwasserflurabständen verändert wurden (SOMMER u. KNOBLAUCH, 1997).

## 2.2 Grundwasserbeschaffenheit

Stofftransporte sind in aquatischen Systemen überwiegend an den Wasserfluß gebunden. Aus der Kenntnis der Wasserflüsse können somit die Stoffflüsse abgeleitet werden. In Auengebieten gilt es grundsätzlich, mit den zwei oben beschriebenen Wasserströmen auch die Stoffströme zu unterscheiden.

Für die Grundwasser- und damit indirekt für die Oberflächenwasserbeschaffenheit sind somit die in Tabelle 2.2-1 aufgeführten Wasserströme mit ihren Stofffrachten von Bedeutung.

Im Gegensatz zu urbanen Gebieten können in Auenbereichen die Stoffeinträge durch die Landwirtschaft eine Hauptrolle einnehmen. Von besonderer Bedeutung sind hierbei die N-Verbindungen, P-Verbindungen und PSM als anthropogene Frachten. Bei den N-Verbindungen und den PSM kommt es zu diffusen Einträgen in den Speisungs- und den Entlastungsgebieten. Die P-Einträge sind vor allem für die direkte Befruchtung der Oberflächengewässer durch Erosion von Bedeutung.

Die anthropogen bedingten Frachten können jeweils in Abhängigkeit von den geologischen Bedingungen durch geogene Frachten überlagert werden, die wiederum Einfluß auf Stoffumwandlungsprozesse im Talgrundwasser nehmen können. In den betrachteten Untersuchungsgebieten gilt dies vor allem für Sulfate und Chloride, die aus unterlagernden mesozoischen Sedimentgesteinen eingetragen werden (Keuper, Muschelkalk und ob. Buntsandstein).

Tabelle 2.2-1: Relevante Stofffrachten in Flußeinzugsgebieten

Hydrogeologische Position	Wasserstrom	Stofffracht
Speisungsgebiete	GWN <sub>S</sub>	Nitrat, PSM Sulfat (geogen)
Transitgebiete	Q <sub>T</sub>	Nitrat Sulfat (geogen)
Entlastungsgebiet	GWN <sub>E</sub>	Nitrat, PSM
	EX <sub>D</sub> , EX <sub>B</sub> , EX <sub>V</sub>	Nitrat, Sulfat (geogen)
	AU <sub>D</sub> , AU <sub>V</sub>	Nitrat, PSM
	AO <sub>D</sub> , AO <sub>V</sub>	Nitrat, Phosphat

PSM Pflanzenschutzmittel

## 2.3 Stoffumwandlungen

Für die Prognose und Bilanzierung der Beschaffenheit des Grundwassers in der Aue sind weiterhin Prozesse der Stoffumwandlung von Bedeutung. Entsprechend der thermodynamischen Bedingungen in den einzelnen Fließpfadabschnitten sind die folgenden Reaktionstypen zu erwarten (s. Tabelle 2.3-1).

Tabelle 2.3-1: Mögliche Stoffumwandlungen

Stoffgruppen	Reaktionen
Nitrate	Reduktion zu Nitrit (S, E), N <sub>2</sub> O und N <sub>2</sub> sowie Ammonium (E)
Ammonium	geogene Bildung (E)
Sulfat (geogener Eintrag)	Reduktion zu Sulfid (E) Reduktion (E) biol. Abbau (S, E)

E Entlastungsgebiet, S Speisungsgebiet

### ***Nitratreduktion***

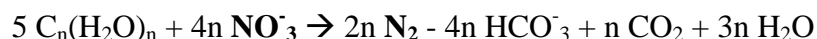
Das Nitrat unterliegt während der Boden- und Grundwasserpassage vielfältigen biochemischen Umwandlungsprozessen. Chemische Reaktionen spielen dabei nach RÖDELSBERGER et al. (1984) kaum eine Rolle.

Für die Nitratreduktion werden verschiedene Prozesse unterschieden (ROHMAN U. SONTHEIMER 1985):

#### ***a) Denitrifikation***

Bei der Denitrifikation wird Nitrat oder Nitrit mit Hilfe von Bakterien (Denitrifikanten) zu gasförmigen Stickstoffverbindungen abgebaut (N<sub>2</sub>O oder N<sub>2</sub>). Bei Mangel an freiem Sauerstoff verwenden diese Bakterien den im Nitrat gebundenen Sauerstoff zum Stoffwechsel. Der organische Kohlenstoff ist für die Denitrifikation einer der wichtigsten Faktoren, da er als Elektronendonator wirkt. Bei der Denitrifikation werden zwei Reaktionstypen unterschieden.

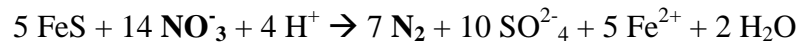
- *heterotrophe Denitrifikation*  
Hierbei handelt es sich um den wohl am häufigsten vorkommenden Prozeß der Nitratreduktion. Als Kohlenstoffquelle und Wasserstoffdonatoren dienen organische Substanzen, die in vielfältiger Weise in Sedimenten vorkommen.  
Die allgemeine Reaktionsgleichung des Abbauprozesses lautet:



Entsprechend der abgebauten Nitratmenge erhöht sich hierbei die Konzentration an Hydrogenkarbonat.

- *autotrophe Denitrifikation*

Als Kohlenstoffquelle dient Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>); als Protonendonator dienen anorganische Stoffe (s. B. FeS<sub>2</sub>). Diese Form der Denitrifikation erfordert spezielle Mikroorganismen und das ausreichende Vorhandensein von verfügbaren Sulfiden. Für die autotrophe Denitrifikation kann folgende Reaktionsgleichung angegeben werden:

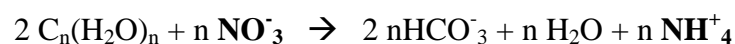


Bei diesem Reaktionstyp kommt es zu einer Zunahme an Sulfat und einer Erhöhung der Konzentration von Fe(II).

Das Endprodukt der Denitrifikation ist gasförmiger Stickstoff (N<sub>2</sub>).

**b) Nitrat-Ammonifizierung**

Unter streng anaeroben Bedingungen und unter Anwesenheit bestimmter Enzyme kann die Reduktion des Nitrats bis zur Stufe des Ammoniums führen. Die Reaktionsgleichung für die Nitratammonifizierung lautet:



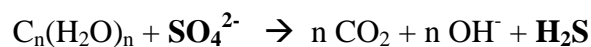
Da für die Ammonifizierung eine strenge Anaerobie und ein sehr niedriges Redoxpotential Voraussetzung sind, wird davon ausgegangen, daß dieser Prozeß erst einsetzt, wenn keine Denitrifikation mehr möglich ist.

**Sulfatreduktion**

Auf Grund der geologischen Gegebenheiten im Untersuchungsgebiet muß als weiterer maßgeblicher Stoffumwandlungsprozeß die Sulfatreduktion angesehen werden.

Auch dies ist ein biochemischer Prozeß, bei dem Bakterien in der Lage sind, unter anaeroben Bedingungen das Sulfat als Oxidationsmittel (Elektronenakzeptor) zu nutzen. Dabei wird Sulfat zu Sulfid reduziert.

Die allgemeine Reaktionsgleichung lautet:



Die wichtigsten Milieubedingungen sind mittlere pH-Werte, niedriges Redoxpotential, Anwesenheit von organischen Stoffen.

**Ammonifizierung**

Ein nicht zu vernachlässigender Prozeß, der vor allem aus Niedermoorgebieten bekannt ist, ist die Ammonifizierung von organischer Substanz. Hierbei wird unter anaeroben Bedingungen die Proteine geogener Biomasse durch Mineralisierung in Ammonium umgesetzt. Dieser Prozeß muß auch für den Bereich Altengottern und Großengottern auf Grund des hohen Anteils an Torfen und Mudden in Betracht gezogen werden.

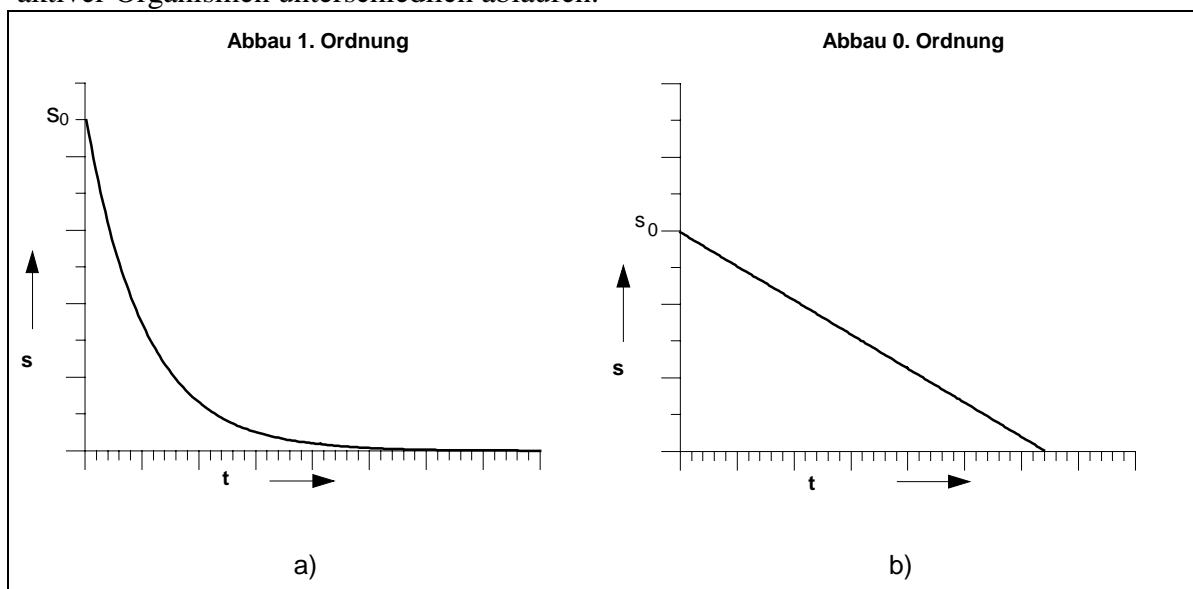
Die Ammonium-Lasten in Gewässern wären dann nicht auf anthropogene Einträge zurückzuführen. (KNOBLAUCH U. ROTH 2000).

Die Umsetzung von Revitalisierungsmaßnahmen, wie sie im Bereich der Unstrutau Gegenstand der Forschungsarbeiten war, hat vor allem die Minderung des Nitratgehaltes im Grundwasser, das dem zentralen Vorfluter zufließt, zum Ziel (REISINGER 1996). Die Übersicht in Tabelle 2.3-1 zeigt, daß die Betrachtungen der Hydrochemie über den unmittelbaren Auenbereich hinaus gehen müssen. Die tieferen Auensedimente sind vor allem für Reaktionen des aus dem Liegenden in die Talsedimente fließenden Grundwassers von Bedeutung. Der Stoffeintragspfad durch die landwirtschaftliche Nutzung *in* der Aue stellt somit nur *einen* Teilstrom für die Stofffracht im Auen-Grundwasserleiter dar.

Diesem Ansatz sollte mit den Untersuchungen zu Grundwasserbeschaffenheit und Stoffumwandlungen im Rahmen des Forschungsprojektes Rechnung getragen werden.

### Abbaukinetik

Die Abbaukinetik eines Stoffes kann in Abhängigkeit von der Verfügbarkeit mikrobiell aktiver Organismen unterschiedlich ablaufen.



**Abb. 2.3-1: Abbaukinetiken**

**a)** - Abbau 1.Ordnung; **b)** - Abbau 0. Ordnung

Nach HAMAKER (1972) gibt es einen generellen empirischen Modellansatz zur Beschreibung des mikrobiellen Stoffabbaus, der sich in einem geschlossenen System (z.B. in einem Batch ohne Stoffzu- und Stoffabgänge) wie folgt beschreiben läßt (RÖBNER, 1997):

$$v = -ds/dt = k \cdot s^m$$

$v$  ... Stoffabbaurate  
 $s$  ... Stoffkonzentration  
 $t$  ... Zeit  
 $k$  ... Stoffabbaukonstante  
 $m$  ... Reaktionsordnung

Danach wird nach Reaktionen 1. Ordnung ( $m = 1$ ) und Reaktionen 0. Ordnung ( $m = 0$ ) unterschieden. Für den mikrobiellen Stoffabbau im Untergrund herrscht oft eine Kinetik 1. Ordnung mit einer Stoffabbaukonstante ( $k$ ) vor, bei der die Abbaugeschwindigkeit abhängig von der Stoffkonzentration ( $s$ ) ist (s. Abb. 2.3-1a). Für sie gilt die Gleichung:

$$s = s_0 \cdot e^{-kt}$$

$s$  ... Stoffkonzentration (mg/l)  
 $t$  ... Zeit (d)  
 $s_0$  ... Anfangskonzentration (mg/l)  
 $k$  ... Stoffabbaukonstante (1/d)

Bei Reaktionen 0. Ordnung mit einer Stoffabbaurate ( $k$ ) ist der Abbau unabhängig von der Stoffkonzentration ( $s$ ) (s. Abb. 2.3-1b). Die Kinetik läßt sich nach folgender Gleichung beschreiben:

$$s = s_0 - k \cdot t$$

$s$  ... Stoffkonzentration (mg/l)  
 $t$  ... Zeit (d)  
 $s_0$  ... Anfangskonzentration (mg/l)  
 $k$  ... Stoffabbaurate (mg/l·d)

In beiden Funktionen sind die Anfangskonzentration  $s_0$  und die Stoffabbaukonstante/rate  $k$  die unbekannt Parameter. Sie können durch Regressionsverfahren der gemessenen Abbaukurven ermittelt werden.

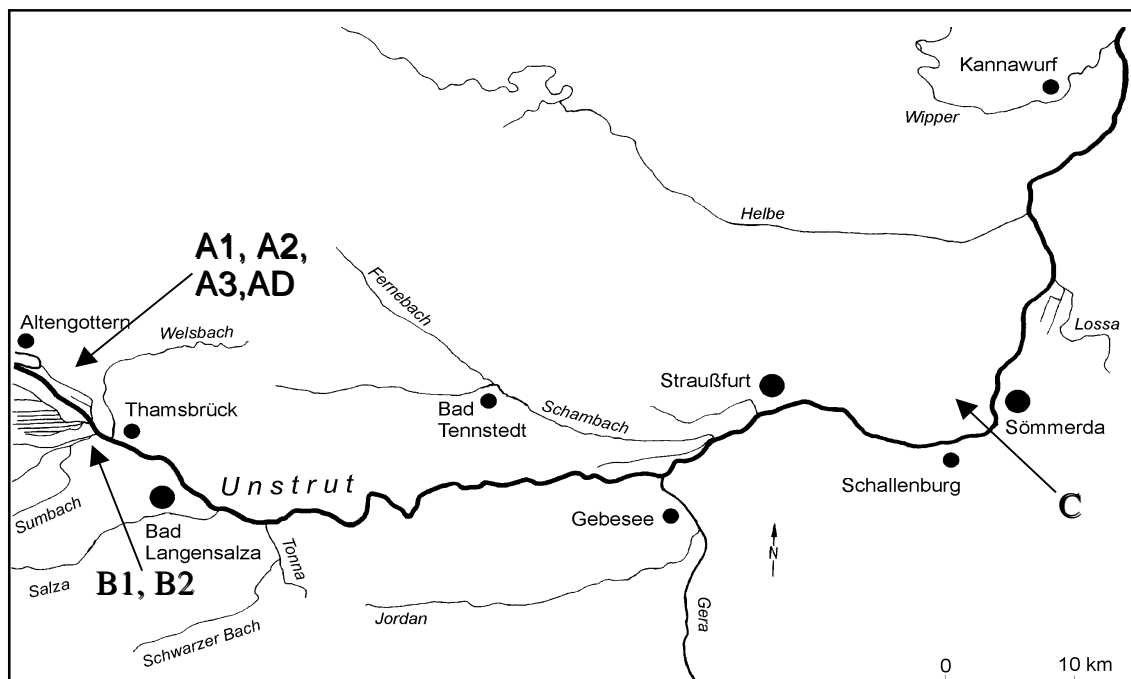
### 3 Untersuchungsmethodik

#### 3.1 Untersuchungsgebiete und Recherchen

##### *Festlegung und Abgrenzung der Untersuchungsgebiete*

Das **Hauptuntersuchungsgebiet** des Teilprojektes Grundwasser wurde in Abstimmung mit den Projektbeteiligten in den Bereich der Untersuchungsflächen A und B der Teilprojekte

2 und 3 (Stoffflüsse und Ökologische Bewertung) gelegt (s. Abb. 3.1-1). Maßgebliche Beweggründe für die Wahl des Gebietes Altengottern waren die Anlage der Versuchsflächen im Altengotternschen Ried mit der Neuerrichtung von Lysimetern im Bereich der Aue und auf der Speisungsfläche durch die Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TP 2) sowie die betriebswirtschaftlichen Untersuchungen des TP 4 in der Agrargenossenschaft Großengottern.



**Abb. 3.1-1: Untersuchungsflächen der Teilprojekte 1 - 3.**

**A1 ... A3, AD:** Versuchsflächen Altengottern (TP1, TP2, TP3); **B1, B2:** Versuchsflächen Thamsbrück (TP 3); **C:** Referenzfläche Schallenburg (TP 3)

Das Untersuchungsgebiet für das Teilprojekt Grundwasserdynamik geht dabei auf Grund der hydrogeologischen Gegebenheiten über die eigentlichen Referenzflächen Altengottern hinaus. Die Speisungsgebiete waren, um die geohydraulischen Prozesse komplex fassen zu können, mit in das Untersuchungsgebiet einzubeziehen.

Ausgangspunkt für die Abgrenzung des Untersuchungsgebietes ist der hydrogeologische Aufbau des Thüringer Beckens zwischen Mühlhausen und Bad Langensalza. Dieser ist in SEIDEL (1995) und für das Gebiet Mühlhausen bis Bad Langensalza in TREFFURT (1982),

eingehend beschrieben. Bei TREFFURT (1982) und SCHREIBER (1989) sind die aus dem geologischen Bauplan des Thüringer Beckens sich ableitenden hydrogeologischen Gegebenheiten eingehend beschrieben.

Aufgrund dieser Untersuchungsergebnisse wurden in erster Näherung die Grenzen der oberirdischen Einzugsgebiete sowie die bei TREFFURT (1982) beschriebene Permeabilitätsbarriere des Muschelkalk-GWL als Grenzen des Untersuchungsgebietes angenommen. Zur Erfassung der maßgeblichen Speisungsgebiete für den im Liegenden der Auensedimente lagernden Unteren Gipskeuper wurde die Schichtgrenze Lettenkeuper / Unterer Gipskeuper im Südwesten und im Nordosten als Begrenzung des Untersuchungsraumes gewählt. Die südöstliche und nordwestliche Grenze des Untersuchungsgebietes wurde durch die Begrenzung der Untersuchungen auf den Unstrut-Abschnitt Bollstedt bis Thamsbrück vorgegeben (s. Kap. 4.1). Aus den geologischen Gegebenheiten ergaben sich für das Untersuchungsgebiet die in Tabelle 3.1-1 dargestellten Eckpunkte.

Um die Ergebnisse mit den Gegebenheiten anderer Abschnitte des Unstrutverlaufes vergleichen zu können, wurden im Verlauf der Projektbearbeitungszeit zwei **weitere Abschnitte** des Unstruttals hydrogeologisch bearbeitet. Dies erfolgte durch zwei Diplomarbeiten am Institut für Geowissenschaften der Friedrich-Schiller-Universität Jena. In der Zeit von November 1997 bis Mai 1998 wurde durch Herrn Gerold HESSE eine Diplomarbeit zum Thema "Grundwasserhydraulik und -beschaffenheit der Unstruttaue zwischen Wundersleben und Leubingen" (Umgebung von Sömmerda) bearbeitet. Seit September 1999 läuft eine weitere Diplomarbeit zu hydrogeologischen Untersuchungen des Unstruttals zwischen Artern und Landesgrenze.

Zur Festlegung dieser Gebiete kam es in Abstimmung mit dem BMBF-Projekt. Im Bereich der Umgebung Sömmerda befinden sich bei Schallenburg die Referenzglächen des TP 3. Das Gebiet Artern bis Landesgrenze liegt in dem Raum, der von dem TP 5 (volkswirtschaftliche Analysen - Bretleben bis Landesgrenze) zu untersuchen war.

Tabelle 3.1-1: Eckkoordinaten der Untersuchungsgebiete

Eckpunkt	Hauptuntersuchungsgebiet Altengottern	Teilgebiet Sömmerda (HESSE, 1998)	Teilgebiet Artern
Links oben	HW: 56 74 000 RW: 43 95 000	HW: 56 75 000 RW: 44 30 000	HW: 56 96 000 RW: 44 48 000
Rechts unten	HW: 56 65 500 RW: 44 05 500	HW: 56 66 000 RW: 44 40 250	HW: 56 81 000 RW: 44 62 000

Alle weiteren Beschreibungen zur Untersuchungsmethodik betreffen das **Hauptuntersuchungsgebiet Altengottern**.

Die Sichtung des Datenbestandes in der Thüringer Landesanstalt für Geologie erbrachte Daten von insgesamt 101 Bohrungen (s Tab. 3.1-2).

Jedoch ist der Informationsgehalt der Bohrdokumentationen für die hydrogeologischen Fragestellungen primär unzureichend. So handelt es sich z.B. bei den Baugrundbohrungen und den Flachbohrungen der Torferkundung meist um Bohrmeisterschichtenverzeichnisse,

die auf den Bohrzweck ausgerichtet sind und nur über Analogieschlüsse hydrogeologische Aussagen gestatten.

Tabelle 3.1-2: Anzahl und Art der ausgewerteten geologischen Aufschlüsse

Anzahl	Art	Quelle	Archiv
33	Baugrundbohrungen flachgründig	verschiedene	TLG
15	Hydrogeologische Bohrungen	Erkundung Dingelstädt TREFFURT (1989)	TLG
22	Erkundungsbohrungen flachgründig	Torferkundung Altengottern	TLG
31	Erdgas-Bohrungen	Erdöl-Erdgas Gommern	TLG

Die Erdöl-/Erdgasbohrungen sind meist sehr tief und reichen bis in den Muschelkalk bzw. in die Gesteine des liegenden Zechsteins. Da die Erkundung der Kohlenwasserstoffe sich auf die Zechstein-Schichten konzentrierte, sind die durchbohrten Keuper-Schichten ebenfalls nur wenig dokumentiert.

Aufgrund des hydrogeologischen Erkundungsziels sind die Bohrungen der Erkundung Dingelstädt (TREFFURT, 1982) am besten dokumentiert.

Die Verteilung der Bohrungen ist innerhalb des Untersuchungsgebietes sehr inhomogen. Die Erdöl-/Erdgas-Bohrungen sind vor allem im nordöstlichen Teil des Untersuchungsgebietes, in den nordweslichen Ausläufern des Langensalzaer Gewölbes, zu finden. Die Baugrundbohrungen finden sich im Bereich von Ortslagen sowie entlang von Hochspannungsstrassen.

Auf dichtem Raum sind im Bereich der Untersuchungsfläche Altengottern die Flachbohrungen der Torferkundung, die jedoch die Sedimentablagerungen der Unstrutau nicht vollständig durchteuft haben.

Über den geologischen Aufbau des Großgotternschen Ried gibt außerdem die Arbeit von SCHULZE (1980) Auskunft, in der der Sedimentaufbau in Schnitten zwar detailliert dargestellt ist, jedoch konnten diese nur zu generellen Aussagen herangezogen werden, da die Schnittlinien in den Anlagen nicht enthalten waren.

Grundlage für die erste Befahrung waren die Meßstellenlisten der genannten Datenquellen (TREFFURT, 1982; SCHREIBER, 1989) sowie eine Zusammenstellung der noch betriebenen Staatlichen Meßstellen des Grund- und Oberflächenwassers (Staatliches Umweltamt Sondershausen). Eine Liste der aufgenommenen Meßstellen ist in Anlage 2-3 beigefügt.

### ***Vorbereitung der Feldarbeiten***

Die Datenrecherche und die Auswertung der vorhandenen Aufschlüsse dient auch der Vorbereitung der geplanten Feldarbeiten.

Hier galt es, sowohl die Lage der Drucksondierprofile als auch der geplanten Meßstellen zu konkretisieren.



Die Lage der **Drucksondierprofile** war dabei nach folgenden Kriterien festgelegt worden:

- \* Verbreitung der quartären Auelehmschichten,
- \* Verbreitung der quartären, fluviatilen Sande und Kiese, die den Auelehm unterlagern,
- \* Verlauf des Vorfluters Unstrut

Die Lage der **Grundwassermeßstellen** wurde nach folgenden Kriterien festgelegt:

- \* Lage vorhandener Meßstellen, die das Quartär oder den liegenden Keuper repräsentieren,
- \* Verlauf des Vorfluters Unstrut
- \* Grundwasserfließrichtung in den Schichten des Keupers
- \* Fallrichtung der Schichten des Keupers

### **3.2 Felduntersuchungen**

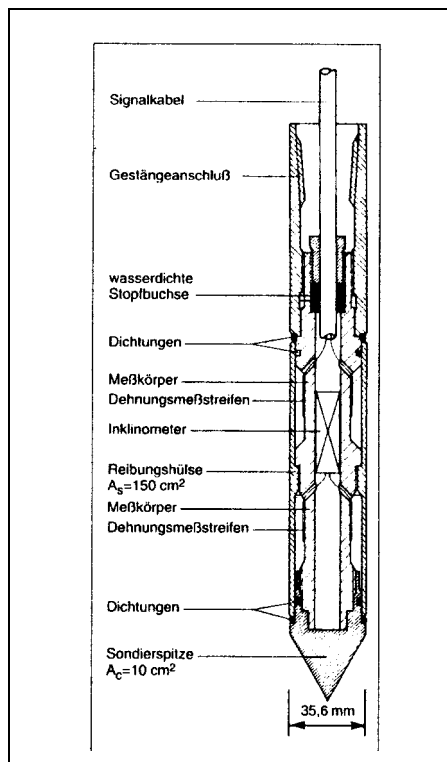
Das Meßkonzept im Untersuchungsgebiet Altengottern wurde so aufgebaut, daß sowohl die hydraulischen als auch die Beschaffenheitsdaten im Speisungsgebiet und im Entlastungsgebiet erfaßt werden können.

In einer ersten Geländebefahrung am 7. und 8. November 1996 wurden aus den Erkundungsberichten (TREFFURT, 1982 und SCHREIBER, 1989) recherchierte Meßstellen im Bereich der Mühlhausen-Langensalzaer Teilmulde angefahren und aufgenommen. Dabei wurde sich vorerst auf die Grundwasserbeobachtungsrohre konzentriert, wobei einzelne Brunnen ebenfalls mit aufgenommen wurden. Bei der Befahrung ging es um eine Erfassung der Meßstellen hinsichtlich ihrer Art, ihrer Existenz und ihres Zustandes. Von den insgesamt 47 aufgesuchten Meßstellen waren nur 19 Meßstellen meßbar. Es stellt sich demnach als äußerst kompliziert dar, aus den vorhandenen Meßstellen des Untersuchungsgebietes ein geeignetes Meßnetz aufzubauen, zumal die Zuordnung der Meßstellen zu den stratigraphisch relevanten Horizonten nochmals die Anzahl der verwendbaren Meßstellen verringert (5 Meßstellen standen im Muschelkalk und wurden deshalb ausgesondert). Somit waren in die Untersuchungen verstärkt Hausbrunnen der den Untersuchungsflächen umliegenden Ortschaften einzubeziehen.

#### **Drucksondierungen**

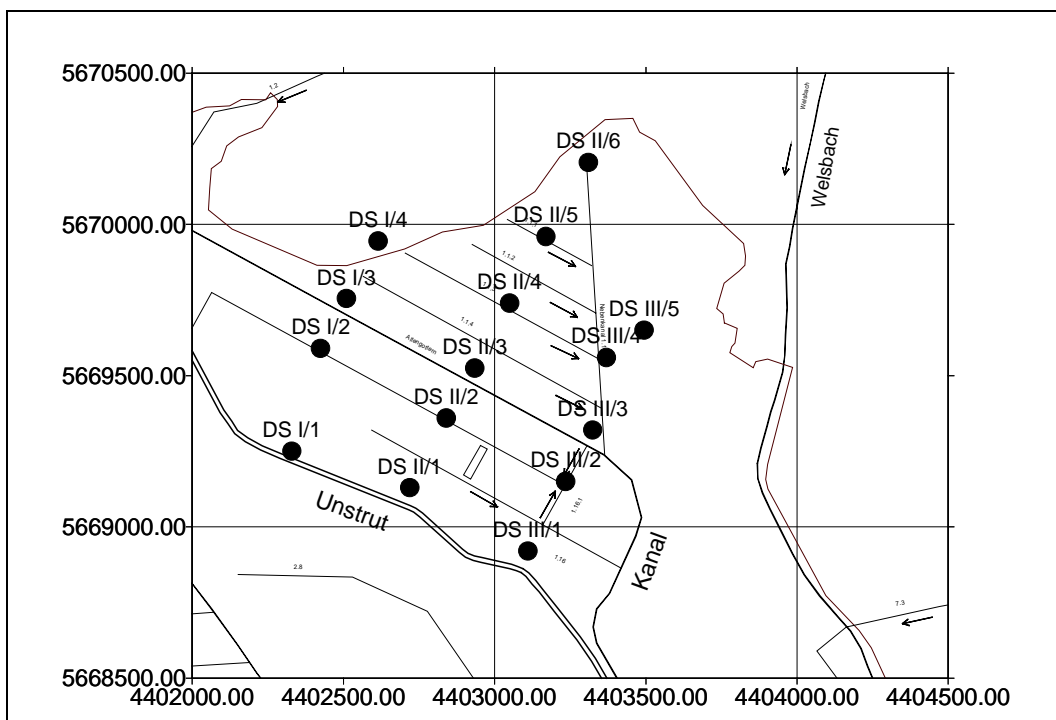
Zur Zustandserfassung des Auesedimentes wurden im Februar / März 1997 mittels Drucksondierungen Schichtenaufnahmen bis auf den liegenden Untergrund (Gipskeuper) durchgeführt.

Bei dem aus der Baugrunduntersuchung entlehnten Verfahren der Drucksondierungen handelt es sich um ein Aufschlußverfahren, bei dem eine zylindrische Sondierspitze (s. Abb. 3.1-1) mit einer konstanten Geschwindigkeit von 2 mm/s über ein Sondiergestänge mit max. 200 kN in den Boden gedrückt wird. Die dabei gewonnenen Meßwerte wie Spitzendruck und Mantelreibung werden analog aufgezeichnet und digital registriert.



**Abb. 3.2-1: Elektrische Sondierspitze System FUGRO**

(Quelle: FUGRO Consult GmbH)



**Abb. 3.2-2: Lage der Drucksondierungen im Altengotternsches Ried**

Die Drucksondierungen DS II/1 bis DS II/6 wurden zu Grundwassersammlern ausgebaut.

Über das Verhältnis von Mantelreibung und Spitzendruck werden Aussagen zur Lithologie abgeleitet. Es gilt dabei:

$$R_f = \frac{f_s}{q_c} \cdot 100\% \quad (3)$$

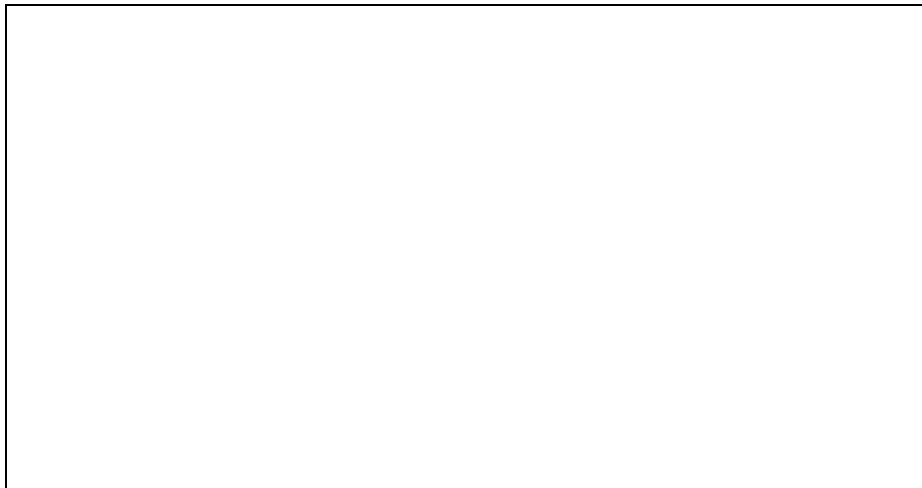
$R_f$  ... Reibungsverhältnis  
 $f_s$  ... Mantelreibung (MN/m<sup>2</sup>)  
 $q_c$  ... Spitzendruck (MN/m<sup>2</sup>)

Mit diesen Drucksondierungen wurden Boden- und Grundwasserproben aus verschiedenen Horizonten des Auesedimentes entnommen. Dies erfolgte mit den Techniken der MOSTAP- und BAT-Probenahme durch die Firma FUGRO GmbH Berlin.

Insgesamt wurden 15 Drucksondierungen durchgeführt mit Teufen bis zu 9 m (s. Abb. 3.2-2). Dabei wurden insgesamt 23 Grundwasserproben (BAT-Proben) und 28 Bodenproben (MOSTAP-Liner) entnommen.

### **Meßstellenbau**

Zur ständigen teufenorientierten Grundwasserprobennahme aus dem Auesediment wurden mittels der oben beschriebenen Drucksondiertechnik entlang des Profils II (DS II/1 bis DS II/6) sechs Grundwasserentnahmepunkte (Bezeichnungen: GWS II/1 bis GWS II/6) mit insgesamt 17 **Grundwassersammlern** installiert. Diese Sammler können mittels einer tragbaren Vakuumpumpe beprobt werden (s. Abb. 3.2-3).



**Abb. 3.2-3: Grundwassersammler in Drucksondierloch**

Zur ständigen Grundwasserstandsmessung wurden **drei Grundwassermeßstellen** installiert. Zwei Meßstellen sind im Bereich der Aue positioniert und sollen das Entlastungsgebiet reflektieren. Die Meßstelle Agt 1/97 (in Unstrutnähe) wurde als Zweifachmeßstelle (Gruppenmeßstelle) abgeteuft. Der obere Filter steht in den quartären Deckschichten; der untere Filter im Keuper, der hier verkarstet ist.

Die Meßstelle Agt 3/97 soll die Verhältnisse des Speisungsgebietes dokumentieren. Problematisch beim Abteufen stellten sich in dieser Bohrung die Verhältnisse im Keuper dar, der sich hier nahezu unverkarstet und damit nur gering wasserdurchlässig zeigte.

Die Bohrungen wurden im Seilkernbohrverfahren niedergebracht. Die Bohrung Agt 1/97 o wurde durchgehend als Linerprobe entnommen. Die Liner wurden nach der Probennahme sofort verschlossen und eingefroren, um die Milieuverhältnisse des Porenwassers nicht zu stören.

In Tabelle 3.2-1 sind die Lage und Ausbaudaten zusammengestellt; in Anlage I/4-6 sind die Bohrprofile dargestellt.

Tabelle 3.2-1: Lage- und Ausbaudaten der abgeteufen Grundwassermeßstellen

	F Agt 1/97o	F Agt 1/97u	F Agt 2/97	F Agt 3/97o
HW	5669178	5669176	5670234	5671690
RW	4402895	4402895	4403321	4403560
Ansatzpunkt (m ü. NN)	176,1	176,1	177,3	198,4
Meßpunkt (m ü. NN)	177,117	176,950	178,410	199,640
Endteufe (m)	10,0	35,0	30,0	40,0
Enddurchmesser (mm)	273	250	250	250
Rohrdurchmesser	DN 125	DN 125	DN 125	DN 125
Filterlage (m u. GOK)	6,0 - 7,0	20,0 - 31,0	18,0 - 26,0	20,0 - 35,0
Filterkies (m u. GOK)	5,9 - 8,2	18,0 - 35,0	14,5 - 30,0	10,0 - 40,0

Die neuen Grundwassermeßstellen wurden mit Drucksensoren und Datenloggern zur kontinuierlichen Wasserstandsmessung ausgerüstet.

Da sich im Laufe der Bearbeitung des Projektes immer wieder die Fragen nach Grundwasserflurabständen im Altengotternschen und im Großengotternschen Ried stellte, wurden weitere Grundwassermeßstellen als sog. **Flachpegel** (FP 1 - FP 9) gesetzt. Die Bohrungen für diese Meßstellen wurden mittels Handbohrgerät niedergebracht und als 1"-Pegel ausgebaut. In gleicher Bauart wurden an den Grundwassersammlern GWS II/1 - GWS II/6 Flachpegel gesetzt, um auch dort den Grundwasserflurabstand ermitteln zu können.

Die Bohrungen wurden jeweils bis ca. 1 m u. GW-Anschnitt niedergebracht. Der untere Meter der Meßstellen ist jeweils verfiltert. In Tab. 3.2-2 sind die Lage- und Ausbaudaten der Flachpegel zusammengestellt.

Die Lage aller Grundwassermeßstellen, die in die Untersuchungen einbezogen wurden, ist in Anlage I/2-1 wiedergegeben. Da nicht von allen Grundwassermeßstellen genaue Höhenangaben der Meßpunkte vorlagen, wurde im April / Mai 1997 ein **Nivellement** der Grund- und Oberflächenwassermeßstellen vorgenommen. Grundlage für das Nivellement waren staatliche Höhenfestpunkte und die Höhenangaben trigonometrischer Punkte.

Tabelle 3.2-2: Lage und Ausbau der Flachpegel

Name	RW	HW	GOK	Filterlage
FP1	4403377	5669202	175,9	1,0 - 2,0
FP2	4403318	5669108	177,0	1,0 - 2,0
FP3	4403175	5668925	175,9	1,0 - 2,0
FP4	4403140	5668860	176,4	2,0 - 3,0
FP5	4404210	5667540	174,6	2,0 - 3,0
FP 6	4400530	5668210	177,4	1,5 - 2,5
FP 7	4401320	5668580	177,2	1,0 - 2,0
FP 8	4401390	5668050	177,2	1,0 - 2,0
FP 9	4401230	5669880	177,6	2,0 - 3,0

FP ... Flachpegel

### **Mengenmessungen**

Um das stationäre Strömungsmodell bezüglich der Durchflußmengen der Unstrut mit ihren zahlreichen Nebenflüssen sowie des verzweigten Grabensystems kalibrieren zu können, wurden im April 1998 **Oberflächenwasserabflußmessungen** durchgeführt. Die Messungen wurden mit Hilfe des Durchflußmeßgerätes FLOW-MATE 2000 realisiert, das auf einem induktiven Meßprinzip beruht. Durch Deformation des vom Gerät ausgestrahlten elektromagnetischen Feldes wird ein Induktionsstrom verursacht, welcher gemessen wird. Das Gerät mißt alle 5 sec. 10 Perioden und bildet davon den Mittelwert. Die Messungen wurden in Lamellenbreiten von 10 cm, mit Tiefenintervallen von jeweils 10 cm vorgenommen. Die Lamellen wurden mittels Bandmaß horizontal erzeugt und mittels Gliedermaßstab vertikal geteilt. Fehler konnten bei der Tiefenmessung auftreten, da die vorgesehene Grundplatte der Peilstange des Meßgerätes fehlte und durch Sediment auf dem Gewässerboden ein Einsinken der Peilstange nicht zu vermeiden war. An Randbereichen konnten Bewuchs und Rückströmungen die Meßergebnisse beeinflussen.

Insgesamt wurden 31 Gewässerpunkte eingemessen (s. Tab. 3.2-3).

Tabelle 3.2-3: Lage der Meßpunkte der Durchflußmessungen

Nr.	Gewässer	Lage
1	Nordmar	Brücke an B 247
2	Orlbach	Brücke an b 247
3	Sumbach	Brücke an B 247
4	Orlbach	Zufluß in die Unstrut (Großengotternsches Ried)
5	Unstrut	10 m uh Brücke Bad Langnsalza - Thamsbrück
6	”Zwischengraben”	Grg. R., Graben zwischen Suthbach und Karrengaben, oh Zufluß in Karrengaben
7	Karrengaben	Grg. R., oh. Zufluß in den Suthbach
8	Suthbach	Höhe OFW 6 (ehem. Brücke)
9	Suthbach	Grg. R., Wehr 500 m oh Zufluß Karrengaben
10	Suthbach	Grg. R., 200 m uh. Zufluß Stettengraben
11	Suthbach	Grg. R., 100 m oh Zufluß in Stettengraben

Nr.	Gewässer	Lage
12	Stettengraben	Grg. R., 200 m oh Zufluß Suthbach
13	Altengott. Kanal	an der Unterführung unter alte Unstrut
14	Altengott. Kanal	Alteng. R., östlich Rindergehege
15	Altengott. Kanal	OFW K 5 - am Friedhof Altengottern
16	Welsbach	OFW 5, Großwelsbach
17	Welsbach	OFW 4, Brücke über Welsbach, Altengott. Ried
18	Welsbach	Brücke am Sportplatz Thamsbrück
19	Alte Unstrut / Mühlgraben	Brücke am OE Thamsbrück
20	Alte Unstrut	Brücke am OE Thamsbrück
21	Unstrut	450 m uh. Zufluß alte Unstrut
22	Unstrut	Brücke d. Straße Großengottern - Thamsbrück
23	Felchtaer Bach	150 m uh Bahnbrücke; 250 m vor Einlauf in Unstrut
24	Seebach	Brücke an B 247
25	Unstrut	Wehr Altengottern (Unterwasser)
26	Unstrut	400 m oh. Zulauf Felchtbach
27	Suthbach	ehem. Wehr oh. Straßenbrücke Heroldishausen
28	Seebach	30 m uh. Straßenbrücke Seebach
29	Kanaleinlauf	Kanaleinlauf am Deich südlich Altengottern
30	Stettengraben	Straßebrücke Großengottern - Altengottern
31	Suthbach	Ortslage Großengottern, 100 m uh Brücke Goethestraße

Die Ergebnisse sind in Anlage I/2-4 zusammengestellt.

Im Untersuchungszeitraum wurden insgesamt 19 Stichtagsmessungen durchgeführt (s. Tab. 3.2-4). Sie hatten zum Ziel, das Strömungsregime zu unterschiedlichen Zeiten aufzunehmen, und somit die Zustromverhältnisse in die Unstrutae sicher zu klären.

Tabelle 3.2-4: Stichtagsmessungen mit Anzahl der Meßpunkte

Datum	Anzahl der gemessenen Punkte
12.-14.5.97	51
3./4.9.97	55
29.9.-1.10.97	58
24./25.11.	59
15.-17.12.97	61
2.-4.2.98	62
30.03-07.04.98	61
11.5.-13.5.98	75
01.-08.07.98	77
24.-26.8.98	76
24.-26.9.98	79
26.10.-5.11.98	71
5.1.-7.1.99	72
16.-18.3.99	76
19.-20.4.99	76
13.-14.5.99	74
1./2.6.99	46
30.06.1999	49
22.07.1999	42

Im letzten Projektjahr wurden nur noch die Quartärmeßstellen und Oberflächenwassermeßstellen im Altengotternschen und Großengotternschen Ried in die Stichtagsmessungen einbezogen.

Die Ergebnisse der Stichtagsmessungen sind in Anlage I/2-5 aufgeführt.

### ***Probennahmen***

Die Probennahme an den ***Grundwassermeßstellen*** erfolgte jeweils mit der Unterwassermotorpumpe MP 1. Vor jeder Probennahme wurden die Meßstellen abgepumpt. Die Dauer des Abpumpens richtete sich nach Durchmesser und Teufe der Meßstelle. Es wurde angestrebt, das Filtervolumen der Meßstellen dreimal auszutauschen, um Repräsentanz der Meßwerte zu erreichen. Problematisch war hierbei, daß nicht zu allen Brunnen Ausbaudaten vorlagen, die Lage und geologische Position der Brunnen jedoch eine Probennahme erforderte.

Das Grundwasser wurde durch eine Durchflußzelle geleitet, um die Parameter pH, Redoxpotential (in mV), Sauerstoff (in mg/l) und el. Leitfähigkeit (in  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) erfassen zu können.

Insgesamt wurden 38 Grund- und Oberflächenwassermeßstellen im Projektzeitraum bis zu 6 mal beprobt.

Da die konventionelle Probennahme an den Flachpegeln auf Grund des Ausbaus nicht möglich war, wurde mit den ***Grundwassersammlern*** eine Möglichkeit gefunden, aus stark bindigen Sedimenten Grundwasserproben zu entnehmen. Dies geschah mit einer Vakuumpumpe (12 V Betriebsspannung). Als Vakuumvorlage dienten bis zu zwei 1-l-Schliffflaschen. In Abb. 3.2-4 ist das Probennahmeprinzip (a) und die Probennahmetechnik im Feld (b) dargestellt. Die insgesamt 17 Einzelsammler wurden im Projektzeitraum bis zu 15 mal beprobt. Mittels derartiger Grundwassersammler konnte bei optimalem Zufluß eine Wassermenge von ca. 2 l gewonnen werden.

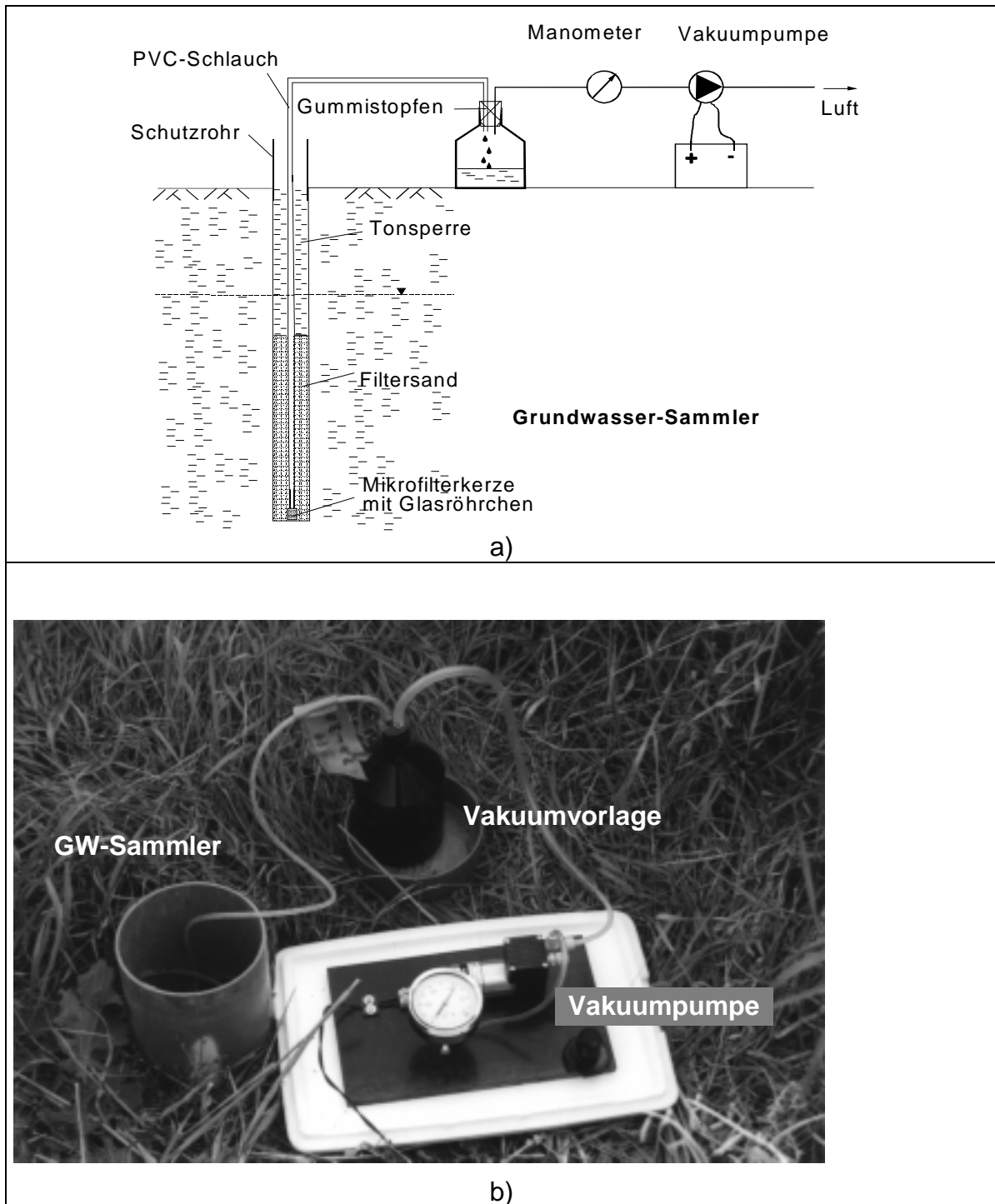


Abb. 3.2-4: Probennahme an Grundwassersammlern



### 3.3 Laboruntersuchungen

#### 3.3.1 Grund- und Oberflächenwasser

Zur Analytik des Grund- und Oberflächenwassers wurde ein zweistufiges Meßprogramm aufgestellt. Ein *kleines Programm* wurde an den Grundwassersammlern durchgeführt. Hierbei kam es vor allem darauf an, die Stoffumwandlungsprozesse der Stickstoffverbindungen zu erfassen. Außerdem war dieses Programm an die maximal mögliche Probenmenge anzupassen. Auf Grund der geringen Durchlässigkeiten der Talsedimente konnten z.T. nur 0,75 l Probenwasser gewonnen werden. An den Grundwassermeßstellen und von den Oberflächenwässern wurden die Proben einem sog. *großen Programm* unterzogen. Das große Programm war darauf ausgerichtet, die geogenen Stoffinhalte zu erfassen, um daraus über den Auenbereich hinausreichende Stoffflüsse erkennen zu können. In Tabelle 3.3-1 sind die untersuchten Inhaltsstoffe des "kleinen" und "großen" Programms aufgeführt (*k.Pr.* / *gr.Pr.*). Alle chemischen und die bodenphysikalischen Untersuchungen wurden vom Labor BGD GmbH Dresden durchgeführt.

Tabelle 3.3-1: Analytikumfang an Grund- und Oberflächenwassermeßstellen

Parameter	Methode	k.Pr.	gr. Pr.	BG (mg/l)
pH-Wert	DIN 38404-C5		X	-
El. Leitföh. (25°C)	DIN EN ISO 27888:1993 (DEV C8)		X	-
TIC	analog DIN EN 1484:1997 (H3)	(X)	X	0,5
TOC	DIN EN 1484:1997 (H3)	X	X	0,5
DOC	DIN EN 1484:1997 (H3)	X	X	0,5
Hydrogencarbonat #	DIN 38409-H3		X	2,5
Gesamthärte	DIN 38409-H6		X	0,001
Calcium	DIN EN ISO 11885:1997 (DEV E22)		X	0,029*
Magnesium	DIN EN ISO 11885:1997 (DEV E22)		X	0,042*
Natrium	DIN EN ISO 11885:1997 (DEV E22)		X	0,069*
Kalium	DIN EN ISO 11885:1997 (DEV E22)		X	0,060*
Eisen(II)	DIN 38406-E1		X	0,1
Eisen	DIN EN ISO 11885:1997 (DEV E22)		X	0,006*
Mangan	DIN EN ISO 11885:1997 (DEV E22)		X	0,015
ortho-Phosphat	DIN EN 1189:1996 (DEV D11)	(X)	X	0,010
Ammonium-N	DIN EN ISO 11732:1997 (DEV E23)	X	X	0,05
Nitrat-N	DIN EN ISO 13395:1996 (DEV D28)	X	X	0,05
Nitrit-N	DIN EN ISO 13395:1996 (DEV D28)	X	X	0,02
Sulfat	DIN EN ISO 10304-1:1995 (DEV D19)	X	X	5
Chlorid	DIN EN ISO 10304-1:1995 (DEV D19)	X	X	2
Sulfid	DIN 38405-D26	X	X	0,01
#	Berechnung aus TIC und pH			
*	Angabe für die gebräuchlichste Linie; BG kann sich in Abhängigkeit von der gemessenen Linie stark unterscheiden			
BG	Bestimmungsgrenze			

Einzelne Grundwassermeßstellen wurden im Labor der TLU Jena auf Pflanzenschutzmittel untersucht. Dies wurde zu den Probennahmen im Oktober 1997 und im April 1998 vorgenommen (Zeitpunkte vorrangig abwärtsgerichteter Vertikalprozesse). Zur Probennahme Oktober 1997 wurden Einzel-PSM-untersucht. Da diese Untersuchung keine Gehalte (unterhalb der Nachweisgrenze) erbrachte, wurde in der Untersuchung April 1998 ein Screening an vier Grundwasserproben vorgenommen.

Tabelle 3.3-2: Pflanzenschutzmittel-Untersuchungen

Meßstelle	Oktober 97 (Einzel-PSM)	April 98 (Screening)
F Agt 1/97 o	X	X
F Agt 1/97 u	X	X
F Agt 2/97	X	X
OFW K 7	X	
Hy Grgt 1/73	X	
Hy Scs 38	X	X
F Agt 3/97	X	
Hy La 1/84	X	
Hy La 2/94	X	
Hy La 4/94	X	

Die Auswahl der Meßstellen, die im April 98 untersucht wurden, erfolgte anhand geologischer Kriterien (Keuper und Quartär) sowie anhand der Befunde an Nährstoffen (Nitrat).

### 3.3.2 Bodenchemische Untersuchungen

Bodenuntersuchungen wurden am Material der Drucksondierproben (MOSTAP-Liner) und an dem tiefgefrorenen Kernmaterial der Bohrungen Agt 1/97 o vorgenommen. Auch das Analysenprogramm für den Boden wurde in einem abgestuften Programm durchgeführt (s. Tab. 3.3-3).

Zu den Bodenuntersuchungen wurden folgende Methoden verwandt:

#### Probenvorbehandlung:

Für die chemischen Analysen der Substrate und Eluate waren folgende Vorbehandlungen notwendig:

- Gesamtgehalte Ca, K, Mg, Na, Fe, P: Schwermetall-Aufschluß (DIN 38 414/7)
- pflanzenverfügbares P, K Doppellaktat-Auszug (VDLUFA-Methode)
- säurelösliches Sulfat 5 g TS / 100 ml HCl

Nach der Elution (Doppellaktat) wurden die Bodensuspensionen jeweils zentrifugiert (15 min, 5000 U/min) und durch Membranfilter (0,45 µm, Celluloseacetat) filtriert.

Tabelle 3.3-3: Untersuchungsprogramme der Bodenproben

Parameter	Methode	1	2	3	BG
Trockensubstanz	DIN 38 414-S2	X	X	X	0,1 % FM
TOC (Boden)	DIN ISO 10694	X	X	X	0,005 % TS
TC (Boden)	DIN ISO 10694	X	X	X	0,005 % TS
o-Phosphat (DL)	Doppellactat-Auszug / ICP (38 406/22)	X	X	X	15 mg/kg TS
Kalium (DL)	Doppellactat-Auszug / ICP (38 406/22)	X	X	X	16 mg/kg TS
Calcium	DIN EN ISO 11885:1997 (DEV E22)	X	X	X	1,0 mg/kg TS
Magnesium	DIN EN ISO 11885:1997 (DEV E22)	X	X	X	1,4 mg/kg TS
Natrium	DIN EN ISO 11885:1997 (DEV E22)	X	X	X	2,3 mg/kg TS
Kalium	DIN EN ISO 11885:1997 (DEV E22)	X	X	X	2,0 mg/kg TS
Eisen	DIN EN ISO 11885:1997 (DEV E22)		X	X	0,3 mg/kg TS
Phosphor	DIN EN ISO 11885:1997 (DEV E22)	X	X	X	2,3 mg/kg TS
Gesamt-Schwefel	in Anlehnung an DIN 51 724- Teil 1 (CS-Mat)	X	X	X	0,01 % TS
Schwefel (550°)	in Anlehnung an DIN 51 724- Teil 1 (CS-Mat)			X	0,01 % TS
Pyrit-S	in Anlehnung an DIN 51 724- Teil 1 (naßchem.)		X	X	0,01 % TS
Sulfat, lösliches	DIN EN ISO 10304-1:1995 (DEV D19), nach Extraktion		X	X	10 g/l
<b>1 ...</b> Analysenprogramm der MOSTAP-Proben <b>2 ...</b> Analysenprogramm der Batch-Bodenproben <b>3 ...</b> Analysenprogramm der Säulenbodenproben					

### 3.3.3 Bodenphysikalische Untersuchungen

Zur Parameterbestimmung für den Säulenversuch und für das Grundwassermodell wurden aus den einzelnen Horizonten der quartären Talsedimente die Kornverteilung des schluffig-tonigen Substrats mittels Naßsiebung bestimmt. An Bodenproben aus den Bohrlinern wurden  $k_f$ -Wert-Bestimmungen mittels Durchflußversuche an einer REV-Anlage vorgenommen.

### 3.3.4 Bodenbiologische Untersuchungen

An Proben, die nach dem Säulenversuch aus der Säule ausgebaut wurden, sind bodenbiologische Untersuchungen vorgenommen worden. Sie dienen der Quantifizierung von Denitrifikanten und Desulfurikanten. Die Bestimmung wurde im Unterauftrag für das Labor BGD GmbH von dem Labor IDUS GmbH Dresden durchgeführt, von dem die Methoden der Bestimmung wie folgt beschrieben wurden:

**a) Denitrifikanten**

Medium nach Kölbel-Boelke (1987) mit 1,0 g Pepton, 0,5 g Citrat, 0,5 g Acetat, 0,5 g Glycerin, 0,5 g Lactat, 0,5 g Glucose, 0,1 g  $K_2HPO_4$ , 0,02 g  $FeSO_4 \cdot 7 H_2O$ , 1000 ml Bidest, pH-Wert auf 7,2 einstellen. Die Auswertung erfolgt nach 50 Tagen (20 °C) = Gasbildung und  $NO_3$ -Nachweis.

**b) Desulfurikanten**

Medium nach Postgate (1963):

Lösung 1: 0,5 g  $K_2HPO_4$ , 1,0 g  $NH_4Cl$ , 0,5 g  $Na_2SO_4$ , 0,1 g  $CaCl_2 \cdot 2 H_2O$ , 1,0 g  $MgSO_4 \cdot 7 H_2O$ , 1,0 g Hefeextrakt, 5,6 ml 50%ige Na-Lactat-Lösung, 975 ml Leitungswasser, einstellen auf pH 7,4.

Lösung 2: 0,5 g  $FeSO_4 \cdot 7 H_2O$ , 10 ml Bidest (zum Lösen leicht angesäuert)

Lösung 3: 0,1 g Na-Thioglycolat, 0,1 g Ascorbinsäure, 10 ml Bidest

Lösungen getrennt autiklavieren und nach Abkühlung vereinigen.

Auswertung nach 50 Tagen (25 °C, anaerob) = schwarze FeS-Ausfällungen.

### 3.3.5 Batch-Versuche

Zur Bestimmung der Denitrifikationsrate am Grundwasser-Sediment-Gemisch wurden **Batch-Versuche** angesetzt.

Als Behälter wurden Transfusionsflaschen (1 l) mit Teflon-Septum und Schraubverschluß genutzt.

Als Ansatz wurden folgende Mengenverhältnisse gewählt:

200 g Boden  
750 ml Wasser  
Argon im Gasraum

Als Wasser wurde Grundwasser aus der Meßstelle Ag 1/97u verwendet. Dem liegt die Modellvorstellung zugrunde, daß die Auesedimente vom Liegenden her vertikal-aufwärts angeströmt werden und damit das Grundwasser aus diesem Pegel den Input für die Abbauprozesse im Auesediment darstellt.

Bei dem Boden handelte es sich um Torf sowie Ton, schluffig, schwach feinsandig.

Insgesamt wurden 3 Batchversuche mit jeweils 12 Flaschen angesetzt.

*Versuchsansatz*

Der Boden wurde aus den tiefgefrorenen Linern der Bohrung Ag 1/97 entnommen. Eine Homogenisierung erfolgte nicht, da es das Ziel war, den Boden unter minimalem Luftzutritt in die Flaschen zu füllen.

Das Grundwasser konnte nicht ohne Luftzutritt entnommen werden. Es mußte deshalb nachträglich den anaeroben Verhältnissen im Gelände wieder angepaßt werden. Dazu wurde das Wasser zunächst mit Argon gestrippt und so sauerstoffabgereichert.

Beim Batch-Versuch 2 wurden die Flaschen zusätzlich in eine Glove-Box vom Typ "la petite" gelegt und diese Box mit Stickstoff gefüllt. Auf Grund des Handlings der Gaszufuhr in die Flaschen bei der Probennahme mußte der Einsatz der Glove-Boxen wieder aufgegeben werden.

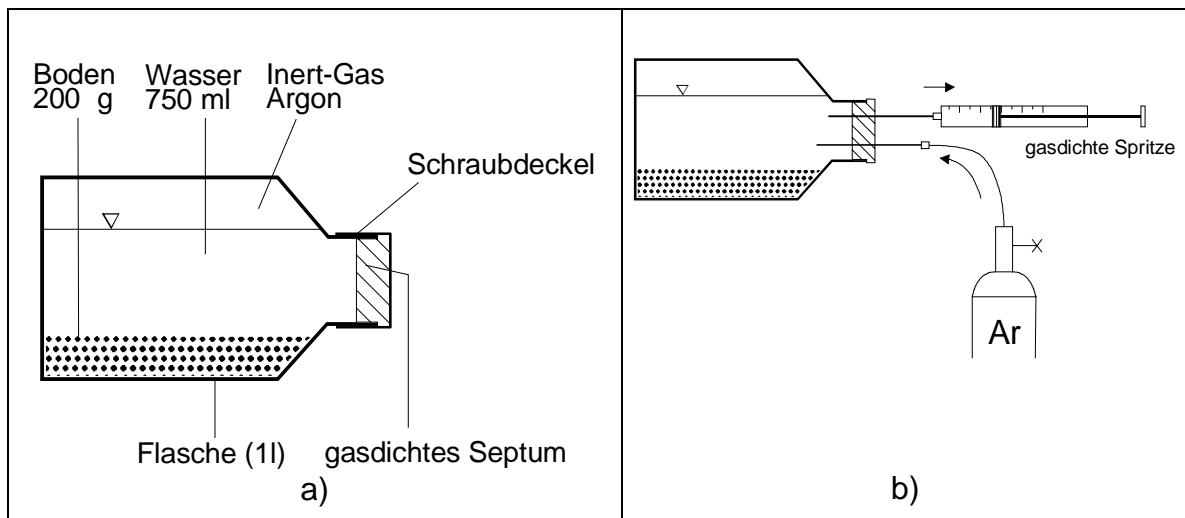
Es wurden insgesamt 3 Versuche mit je 16 Flaschen nach dem in Tabelle 3.3-4 aufgeführten Schema durchgeführt.

Tabelle 3.3-4: Versuchskonfiguration Batch-Versuche

Versuch	Einwaage Boden (g)	Wasser (ml)	Wiederauffüllung nach Probennahme	Substart	Zugaben	Ansatz Nr.
1	200	750	j	Torf	keine	01
					375 mg NaSO <sub>3</sub>	02
				Ton	keine	03
					375 mg NaSO <sub>3</sub>	04
2	200	750	n	Torf	keine	05
					375 mg NaSO <sub>3</sub>	06
				Ton	keine	07
					375 mg NaSO <sub>3</sub>	08
3	200	750	n	Torf	2 mg NaAcetat	09
					2 mg NaAcetat, 375 mg NaSO <sub>3</sub>	10
				Ton	2 mg NaAcetat	11
					2 mg NaAcetat, 375 mg NaSO <sub>3</sub>	12

### *Probennahme*

Bei der Probennahme kam es darauf an, die anaeroben Verhältnisse in den Flaschen aufrecht zu erhalten. Dazu wurden aus dem Wasserüberstand in der Flasche unter gleichzeitiger Zufuhr von Argon-Gas (Ausgleich des Unterdrucks) mittels gasdichter Spritze 50 ml Wasser entnommen.



**Abb. 3.3-1 Batch Versuche**

(a) - Versuchsansatz; (b) - Probenahme

### 3.3.6 Säulendurchlaufversuche

Als zweiter Schritt wurde eine *Säulenversuchsanlage* aufgebaut. Diese diente der laborativen Simulation der Abbauverhältnisse von Nitrat und Sulfat unter naturnahen Bedingungen.

Der Aufbau der Säule ist in den Abb. 3.3-2 und 3.3-3 dargestellt.

In die Säule sind Sedimente entsprechend der natürlichen Abfolge im Bereich der Unstruttau eingebaut. Die Beprobung erfolgt schichtenweise an sechs seitlich angebrachten Probenahmeports mittels gasdichter Spritze.

Als Probenahmeports (s. Abb. 3.3-3 und 3.3-4) wurden Mikrofilterkerzen, wie sie in den Grundwassersammlern zum Einsatz kamen im Innenraum der Säule angebracht und mittels Luer-Lock- und teflonabgedichteten Schraubverbindungen an der Säulenwand befestigt. An der Außenseite der Säule wurden ebenfalls Schraubverbindungen und Luer-Locker Kupplungen jeweils Zweiwegehähne angebracht, an die die gasdichten Spritzen angeschlossen werden konnten. Zwischen den Probenahmen wurden die Zweiwegehähne mittels Stopfen zusätzlich verschlossen, um einen Luftzutritt weitestgehend auszuschließen.

Die Säule wurde mit verschiedenen Wässern beaufschlagt. Das hatte zum einen den Grund, daß aus einer Probenahmestelle das Wasser nicht lange Zeit vorgehalten werden sollte. Zum anderen konnten damit unterschiedliche Input-Konzentrationen realisiert werden. Die Input-Daten gehen aus Tabelle 3.3-5 hervor.

Tabelle 3.3-5: Konzentration und Herkunft des Input-Wassers des Säulenversuches

Probennahmestelle	Konzentrationen (mg/l)	Versuchstage	Zielstellung
Agt 1/97 u	NO <sub>3</sub> -N: 7,42 SO <sub>4</sub> : 1.460 NH <sub>4</sub> -N: n.n. NO <sub>2</sub> -N: n.n.	1 - 61	Verhalten des Wassers aus dem Basement
Lys A4 (TP 2)	NO <sub>3</sub> -N: 48 SO <sub>4</sub> : 132,5 NH <sub>4</sub> -N: n.n. NO <sub>2</sub> -N: n.n.	61 - 125	Verhalten des Wassers aus den nördlichen Keuper-Speisungsgebieten
Hy Scs 38	NO <sub>3</sub> -N: 35 SO <sub>4</sub> : 1.340 NH <sub>4</sub> -N: 32 NO <sub>2</sub> -N: n.n.	125 - 153	Verhalten des Wassers aus den östlichen Speisungsgebieten

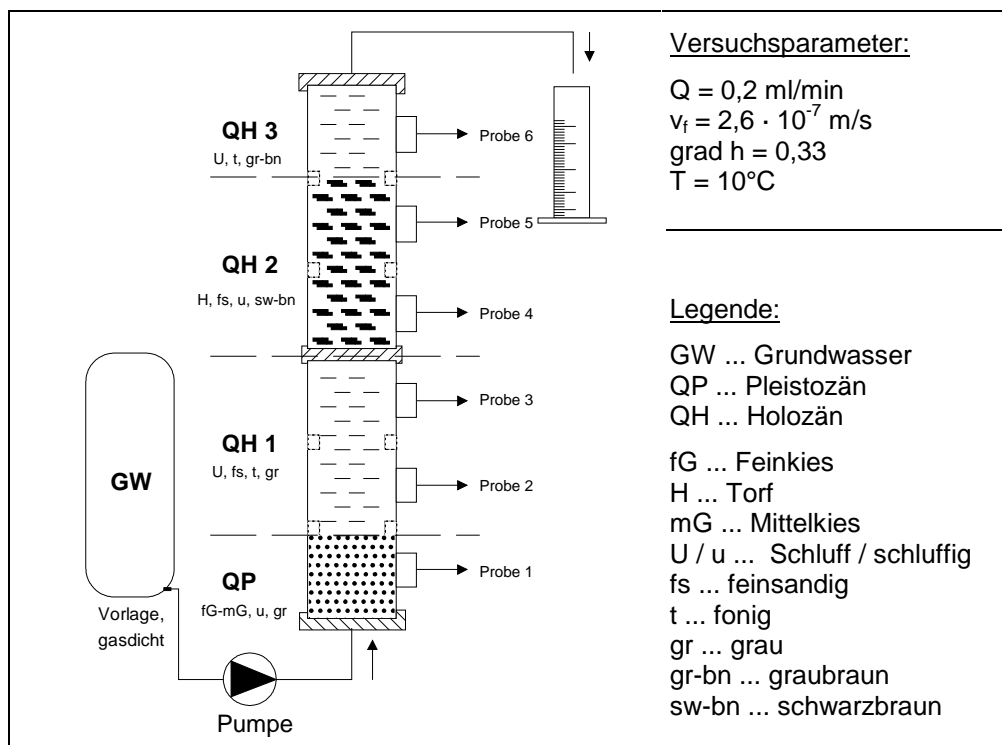
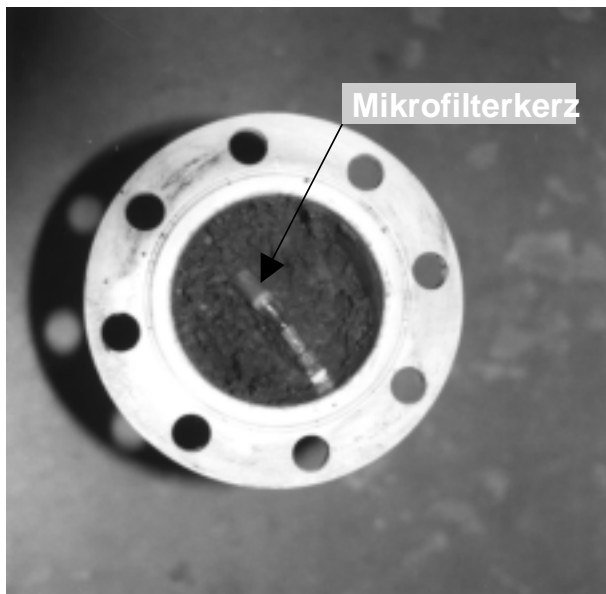


Abb. 3.3-2: Aufbau der Säulenversuchsanlage



**Abb. 3.3-3:**  
**Säule mit Probennahmeport**



**Abb. 3.3-4:**  
**Probennahmeport in der  
Säule**



### 3.4 Modellierungen

#### 3.4.1 Programmsystem MINIHO

Die Modellierungen der Grundwasserströmung wurden im Rahmen eines Unterauftrages bei der Dresdner Grundwasser Consulting GmbH (DGC, Bearbeiter Dr. Gutt) durchgeführt.

Zunächst soll das für die Berechnung des Modells "Unstrut" eingesetzte weiterentwickelte Programmsystem MINIHO (Version 3.3) kurz charakterisiert werden (siehe im Detail GUTT, 1998):

Das Programm MINIHO dient der Simulation der horizontalebene Grundwasserbewegung in einem Grundwasserleitersystem auf der Basis einer unregelmäßigen Rechtecknetz-Diskretisierung. Die maximal 10 Modell-Grundwasserleiter können dabei geschichtet sein.

Hierbei gilt:

- Die Strömung in jedem Grundwasserleiter ist horizontalebene.
- Jeder Grundwasserleiter kann aus maximal 2 Schichten bestehen.
- Die Trennschicht zwischen den Grundwasserleitern wird nur in vertikaler Richtung durchströmt und hat keine Speicherkapazität (quasi-dreidimensionaler Ansatz).
- Die Modell-Grundwasserleiter gelten als direkt verbunden (keine Trennschicht vorhanden), wenn die Oberkante des unteren Grundwasserleiters höher oder gleich der Sohle des darüberliegenden Grundwasserleiters ist. Damit geht das Verfahren in ein echt dreidimensionales über.

Das Programmsystem (bestehend aus Preprozessoren, Berechnungsprogramm und Postprozessoren) ist konsequent auf 32-Bit-Mikrorechner mit MS/DOS-kompatiblen Betriebssystem zugeschnitten. In Abhängigkeit von der Prozessorleistung wird ein Maximum bei 30.000 Netz-Elementen gesehen.

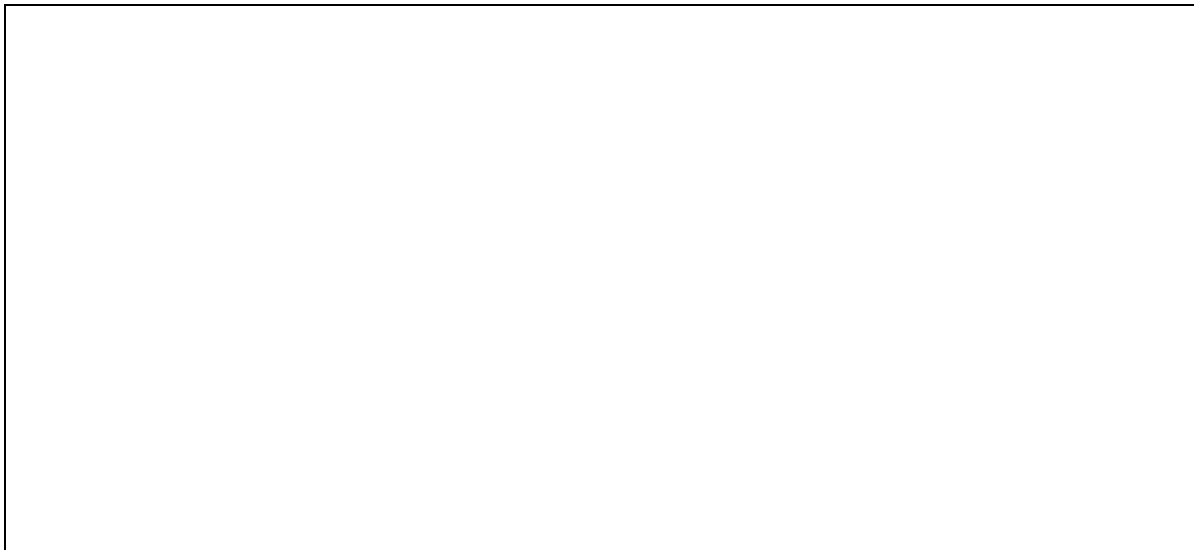
Für die Erfassung und Aktualisierung der Daten stehen innerhalb des Programmsystems spezielle Preprozessor-Programme zur Verfügung. Die Verarbeitung der MINIHO-Ergebnisdaten durch Programme zur Konstruktion von

- Isolinien bzw. 3D-Darstellung (z.Zt. Programm SURFER<sup>TM</sup> integriert)
- Stromlinien und Isochronen (Programm SI-2.3, Eigenentwicklung DGC)
- Ganglinien (wahlweise MS-Excel oder GRAPHER<sup>TM</sup>)
- Vektordarstellungen der Filtergeschwindigkeiten (Programm VELO, DGC)

ist möglich. Mit speziell angepaßten Schnittstellen-Programmen werden die Ausgabedaten von MINIHO in die Eingabedatenstruktur der jeweiligen Auswertprogramme konvertiert. Außerdem besteht eine Schnittstelle zum Beschaffenheits-Simulationsprogramm HORAND.

Das ortsdiskrete Schema hat für das mathematische Modell die in nachfolgender Abbildung dargestellte Form (vertikaler Schnitt):





### **Abb. 3.4-1: Diskretisierungsschema MINIHO (vertikal)**

Als Simulationsmethode kommt ein modifiziertes Finite-Differenzen-Verfahren der alternierenden Richtungen (MADI) zum Einsatz, d.h. zeilen- und spaltenweise wird mit jeweils der halben Zeitschrittweite das Gleichungssystem für die vertikal-ebene Schnittpur gelöst. Dieses Verfahren hat den Vorteil, daß statt eines unter Umständen sehr großen Gleichungssystems viele kleine gelöst werden. Damit werden auch bei großen Modellen noch akzeptable Rechenzeiten am PC erreicht. Außerdem wird zum Aufbau der Koeffizientenmatrix bedeutend weniger Speicherraum benötigt. Eine interne Besonderheit des Programms ist, daß auch wenn Zeilen oder Spalten nicht voll besetzt sind, das volle Gleichungssystem gelöst wird. Das hat den Vorteil, daß die Topologie des Gleichungssystems stets konstant bleibt.

An jedem Modellelement kann eine zeit- oder potentialabhängige Randbedingung 1., 2. und/oder 3.Art berücksichtigt werden.

Bei Randbedingungen 2.Art kann eine obere und untere Grenze für den Wasserstand im Element angegeben werden. Bei Erreichen dieser Grenzen wird die Randbedingung 2.Art in eine Randbedingung 1.Art überführt, mit dem entsprechenden Grenzwasserstand als Randpotential. Eine Sonderrandbedingung 2.Art ist die Grundwasserneubildung. Sie kann entweder als konstant für jedes Element oder als Ganglinie (jedoch dann nur ein Wert für das gesamte Feld) vorgegeben werden.

Eine Randbedingung 3.Art hat folgende Form:

$$Q_3 = ZLW \cdot (h_R - h_i)$$

ZLW - Zusatzleitwert zwischen Rand und Elementeknoten

$h_R$  - Potential auf dem Rand

$h_i$  - Potential im Modellelement

Der Zusatzleitwert repräsentiert z.B. den Kolmationswiderstand eines Gewässers oder die räumliche Entfernung einer Randbedingung 1. Art zum zugehörigen Modellknoten. Das Programm MINIHO gestattet die Erfassung von ZLW als Funktion der Zeit oder als Funktion des Berechnungswasserstandes und  $h_R$  als Funktion der Zeit. Analog der Randbedingung 2. Art kann bei der Randbedingung 3. Art der Volumenstrom  $Q_3$  begrenzt werden. Bei Erreichen der Grenzvolumenströme  $Q_{\min}$  und  $Q_{\max}$  wird die Randbedingung 3. Art für den aktuellen Zeitschritt in eine Randbedingung 2. Art überführt.

Bei starken Sohlhöhenunterschieden zwischen benachbarten Elementen kann es zum Abreißen der Strömung zwischen den Elementen kommen. In diesem Fall wird der hydraulische Leitwert zwischen diesen beiden Elementen gleich Null gesetzt. Die überströmende Wassermenge wird für das Element mit dem höheren Wasserstand als Senke und das Nachbarelement als Quelle berücksichtigt.

Als Feldparameter verarbeitet das Programm auch die Geländeoberfläche.

### 3.4.2 Hydrogeologisches Strukturmodell

Die äußeren Modellgrenzen werden einerseits durch den austreichenden, geklüfteten Keuper und andererseits durch das vordefinierte Untersuchungsgebiet zwischen Höngeda im Nordwesten und Thamsbrück im Südosten gebildet. Das Modellgebiet umfaßt damit das Areal

Rechts:  $43^{\circ}95000 \dots 44^{\circ}05500$   
Hoch:  $56^{\circ}65500 \dots 56^{\circ}74000$

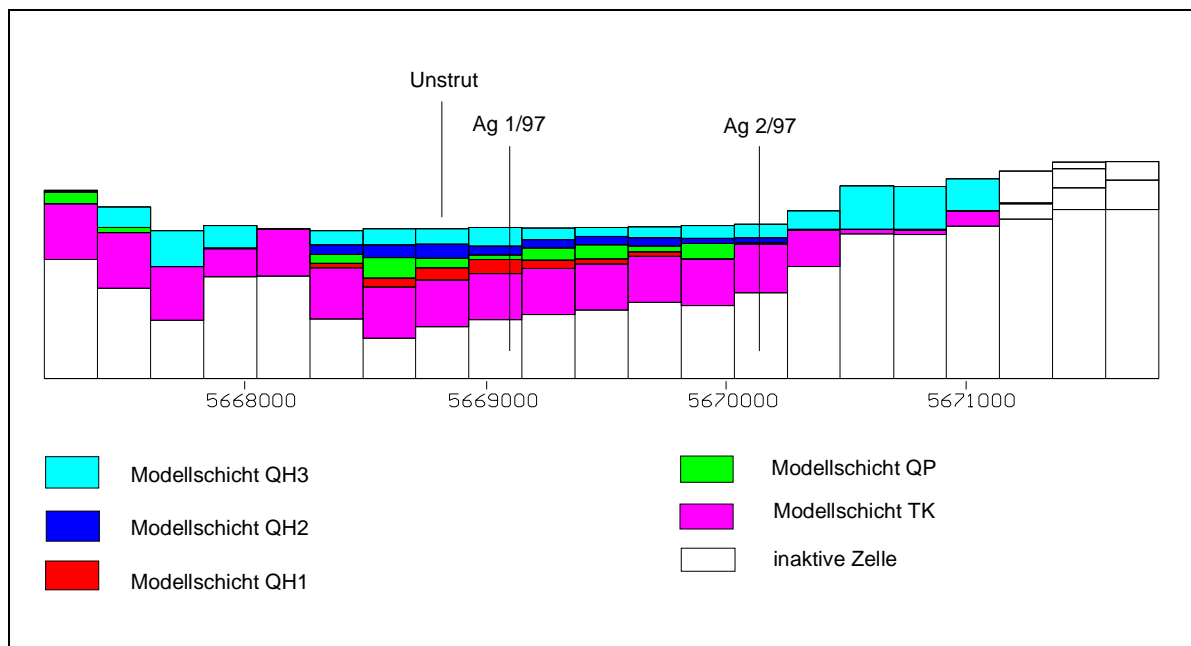
Nach dem generellen Aufbau des Grundwasserleitermodells mit einer Diskretisierungsweite von 250 x 250 m wurde das Modell in seiner Diskretisierung verfeinert, um die zahlreichen Gräben und Kanäle im Bereich des Großengotterschen und Altengotterschen Rieds abbilden zu können. Das Modell besteht nunmehr aus 69 x 69 Modellelementen mit Diskretisierungsabständen zwischen 62,5 m und 250 m.

Die Diskretisierung des Modells und dessen räumliche Einordnung ist der **Anlage I/x1** zu entnehmen. Wie in der Anlage dargestellt, konnten mit diesem Diskretisierungsnetz die Verläufe der Randbedingungen recht gut wiedergespiegelt werden, auch lassen sich damit die Schwankungen der Schichtgrenzen gut erfassen.

Das Grundwasserleiter-Modell für die Unstrut-Aue umfaßt den quartären Schichtkomplex (gegliedert in Holozän und Pleistozän) und den geklüfteten Keuper. Insgesamt besteht das Modell aus 5 Schichten (Modell-Grundwasserleitern), die direkt miteinander in Verbindung stehen. Folgende Schematisierung wurde vorgenommen:

- QH: Holozän      darin Torfeinlagerungen als gesonderte Schicht
- QP: Pleistozän
- TK: geklüfteter Keuper

Weiterhin wurde die Modellschicht QH in drei Schichten aufgeteilt, um die lithologischen Einheiten des liegenden Schluffs (QH 1), der Torfschicht (QH 2) und der hangenden Schluffschicht (QH 3) separat abbilden zu können (s. Abb. 3.4-2).



**Abb. 3.4-2: Hydrogeologisches Strukturmodell (Ausschnitt)**

Den Modellschichten wurden die in Tabelle 3.4-2 aufgeführten  $k_f$ -Werte zugewiesen:

Tabelle 3.4-1: Modellschichten

Schicht	Bezeichnung	$k_f$ -Wert (horizontal)
QH3	Hangendlehm	$0,001 \dots 0,1 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$
QH2	Torf	$0,01 \dots 0,2 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$
QH1	Liegendschluff	$0,001 \dots 0,1 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$
QP	kiesiger Schluff	$0,005 \dots 0,5 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$
TK	verkarsteter Tonstein	$0,05 \dots 0,5 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$

### 3.4.3 Modellparameter

Für jedes der Modellelemente waren folgende geologisch-topografische Daten bereitzustellen:

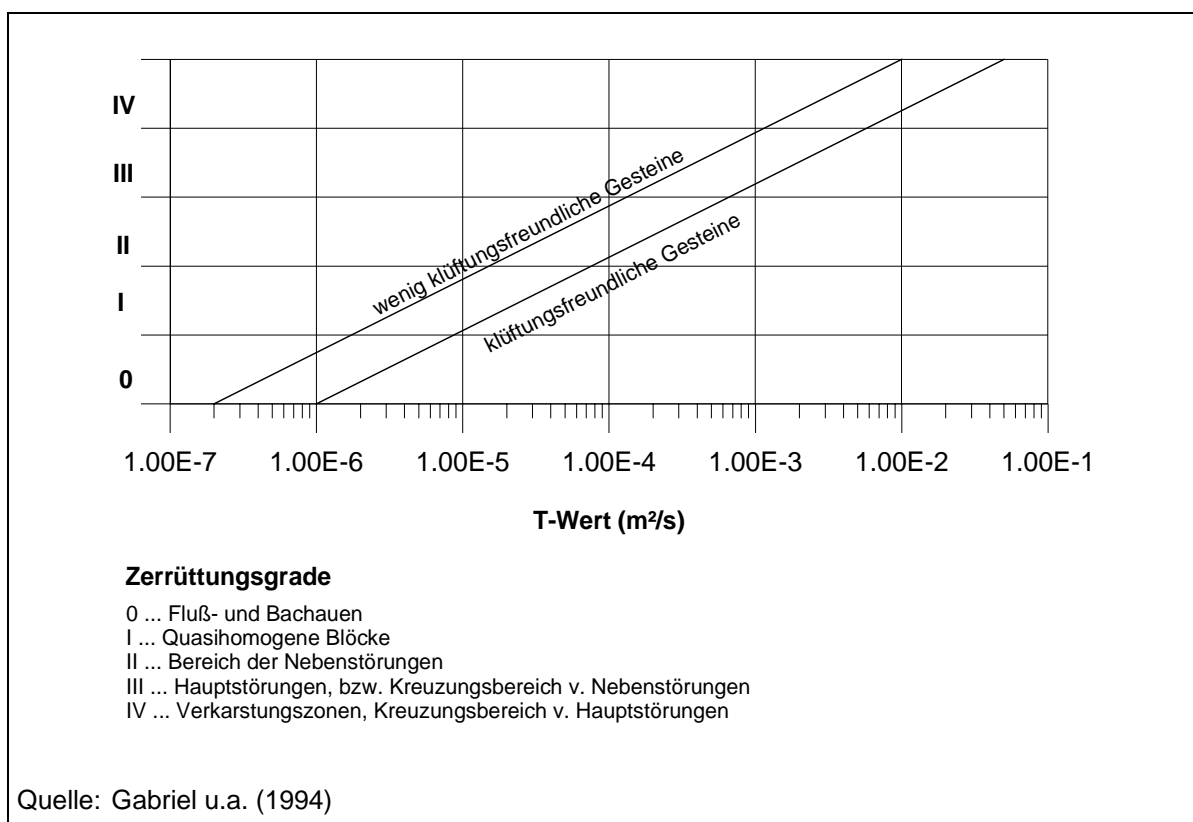
- Geländeoberfläche
- für jede Schicht
  - = Schicht-Oberkante
  - =  $k_f$ -Wert der Schicht
  - = Schicht-Unterkante

Die Geländeoberfläche wurde aus Befliegungs- und Aufschlußdaten sowie aus der topografischen Karte 1 : 10.000 gewonnen. Grundlage für die Daten der Geländeoberfläche innerhalb der HQ-100-Linie der Unstrut waren die digitalisierten Höhendaten, die im Rahmen der Erarbeitung der gewässerökologischen Entwicklungsalternative von der Fa.

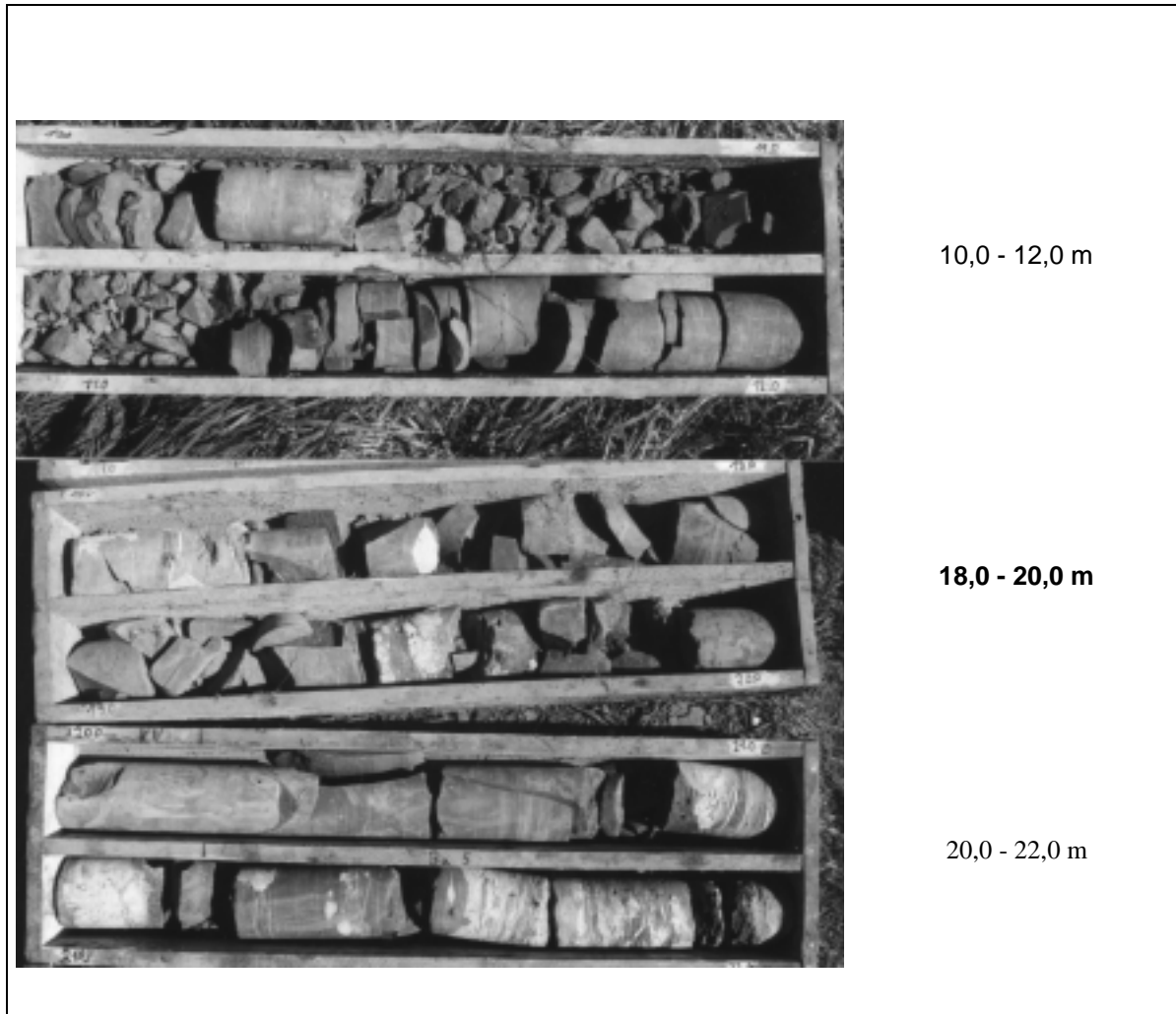
BCE erstellt wurden. Außerhalb der Unstrut-Aue wurde auf die Daten der topographischen Karte 1 : 10.000 zurückgegriffen. Hier wurden die in der topografischen Karte enthaltenen Höhenlinien digitalisiert. All diese Höhendaten (Punktdaten der Befliegung und digitalisierte Isolinien) wurden dann mit dem Programm SURFER auf ein 50-m-Quadratnetz interpoliert. In einigen Arealen wurde das so entstandene digitale Geländemodell manuell nachbearbeitet. In einem letzten Schritt wurde dann das regelmäßige Raster des Geländemodells auf das unregelmäßige des Grundwassermodells übertragen.

Bei den Grundwasserleiter-Parametern wurde in der Regel auf Bohrungen vorangegangener Untersuchungen und auf Eigenerfassungen zurückgegriffen. Die Durchlässigkeiten wurden aus dem Datenspeicher HYRA übernommen und zwischen den Bohrungen interpoliert.

Besondere Aufmerksamkeit wurde der Festlegung der  $k_f$ -Werte für den verkarsteten Gipskeuper geschenkt. Hierzu wurden verschiedene Quellen herangezogen, und miteinander verglichen. Aus hydrogeologischen Gutachten der 70er und 80er Jahre (Archiv der TLG) wurden von den Brunnen, die im verkarsteten Gipskeuper stehen, die T-Werte herangezogen. Das Bohrgut der abgeteufte Bohrungen zeigte im verkarsteten Bereich einen stark zerrütteten Zustand, der im Übergangsbereich zum unverkarsteten Bereich in einen mäßig zerrütteten Zustand überging (s. Abb. 3.4-4) Danach wurde die das Material dem Zerrüttungsgrad II bis III (nach KRAFT u. SCHRÄBER, 1982 in GABRIEL u.a., 1994) zugeordnet. (s. Abb. 3.4-3).



**Abb. 3.4-3: Nomogramm zur Abschätzung des T-Wertes**



**Abb. 3.4-4: Bohrgut der Bohrung Agt 2/97**

Da die Speicherkoeffizienten bzw. effektiven Porositäten der einzelnen Schichten ebenfalls nicht hinreichend genau bekannt waren, und ihre Bestimmung nur durch relativ aufwendige Pumpversuche möglich ist, wurde für gespannte Grundwasserbereiche der Erfahrungswert

$$S = 1 \cdot 10^{-4}$$

angesetzt. In ungespannten Bereichen wird die effektive Porosität von MINIHO aus der Durchlässigkeit ( $k_f$ -Wert) nach folgender Formel berechnet:

$$n_e = 1,33 k_f^{0,22}.$$

### 3.4.4 Innere und äußere Randbedingungen

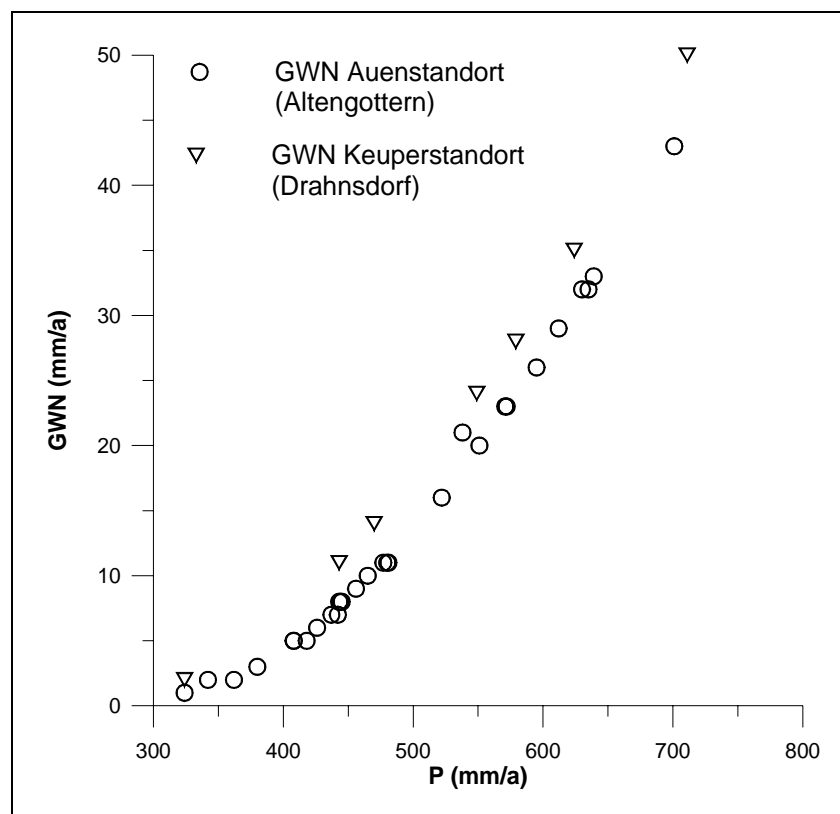
Folgende innere und äußere Randbedingungen wurden in Ansatz gebracht:

- Unstrut als **Randbedingung 1.Art**; zeitlich konstanter, örtlich entsprechend dem Gefälle variabler Wasserstand, Mittelwasser (d.h. 183,6 mNN am Modell- "Eingang" Höhe <sup>56</sup>74000, 170,7 mNN am Ausgang Rechts <sup>44</sup>05500), ohne Kolmation, incl. Berücksichtigung der Staustufen
  - Talsperre Großengottern mit Mittelwasserstand 193,8 mNN (aus Karte 1 : 10.000 abgegriffen) als **RB 1. Art**
  - Rand-Isopyhsen (konstanter Wasserstand) im Keuper (RB 1. Art)
    - Südwestbereich (um Heroldishausen): 195 mNN
    - Süden (bei Schönstedt): 190 mNN
    - Osten (zwischen Thamsbrück und Großwelsbach): 182 mNN
    - Nordwesten (Bereich Höngeda): 189 ... 192 mNN
  - Randzuflüsse (konstante Wassermenge - **RB 2. Art**) in den Keuper als westliche Randbedingung, durchschnittl. 2,22 l/(s · lfd. km)
  - Gräben und Bäche als **Randbedingung 3.Art** (kolmatisierte Sohle) mit Mittelwasserstand und Berücksichtigung des Wasserspiegelgefälles.  
Da für die Kolmationsbeiwerte keine konkreten Meßwerte vorliegen, wurden Sediment-  $k_f$ -Werte angesetzt:
    - $k_f$ -Wert der Kolmationsschicht:  $1 \cdot 10^{-6}$  m/s
    - Dicke der Kolmationsschicht: 10 cm
- Im Modell wird berücksichtigt, daß im Gegensatz zu **infiltrierenden** Gräben die Kolmation bei **Exfiltration** aus dem Grundwasser nur eine untergeordnete Rolle spielt.
- Vereinzelt Grundwasser-Entnahmen durch Haus- und Wirtschaftsbrunnen (Konservenfabrik Großengottern (Saisonbetrieb), Betonwerk Großengottern und Milchviehanlage Seebach (beide unkontinuierliche Förderung)) wurden vernachlässigt.

### 3.4.5 Grundwasserneubildung

Eine wichtige Rolle als Randbedingung spielt die Grundwasserneubildung. Für die stationären Mittelwasserberechnungen wurden die mittels der Berechnungsmethode GEOFEM ermittelten Jahresmittelwerte verwendet (GABRIEL u.a. 1993). Die räumliche Verteilung der Grundwasserneubildung ist in Anlage I/3-2 dargestellt.

Wie die Abbildung 3.4-5 zeigt, kann die jährliche Grundwasserneubildung erheblichen Schwankungen in Abhängigkeit von dem Niederschlag unterworfen sein. Die Beziehung zwischen Niederschlag und Grundwasserneubildung ist dabei nicht linear (ZIEGLER u. GABRIEL 1970).



**Abb. 3.4-5: Beziehung zwischen Niederschlag und Grundwasserneubildung**

Die jährlichen Mittelwerte beinhalten dabei immer einen jährlichen Gang der Grundwasserneubildung. Dieser wurde aus den Bodenwasserhaushaltsberechnungen für die grundwasserbeeinflussten Lysimeter A 1 und A 3 des TP 2<sup>1)</sup> für die Jahre 1997 bis 1999 entwickelt, die vom TP 2 - Stoffflüsse - zur Verfügung gestellt wurden (s. Abb. 3.4-6).

Es wurde dabei von folgender Beziehung ausgegangen:

$$GWN = P - AET - \Delta S \quad (1)$$

GWN: Grundwasserneubildung  
P: Niederschlag  
AET: Reale Evapotranspiration (ETR)  
 $\Delta S$ : Speicheränderung

Die Speicheränderung  $\Delta S$  ergibt sich bei dem Berechnungsprogramm VERD<sup>2)</sup> aus der Differenz (DIFF INH) zwischen Bodenfeuchtedifferenz am Anfang des Berechnungszeitraums (Monat) zum Ende des Berechnungszeitraums und dem Term P - AET.

<sup>1)</sup> Zur Lage der Lysimeter A1 und A 3 im Altengotternschen Ried s. Abschlußbericht TP 2 (KNOBLAUCH u. ROTH 2000)

<sup>2)</sup> Das Berechnungsprogramm VERD wird im Abschlußbericht des TP 2 (KNOBLAUCH u. ROTH 2000) näher beschrieben.



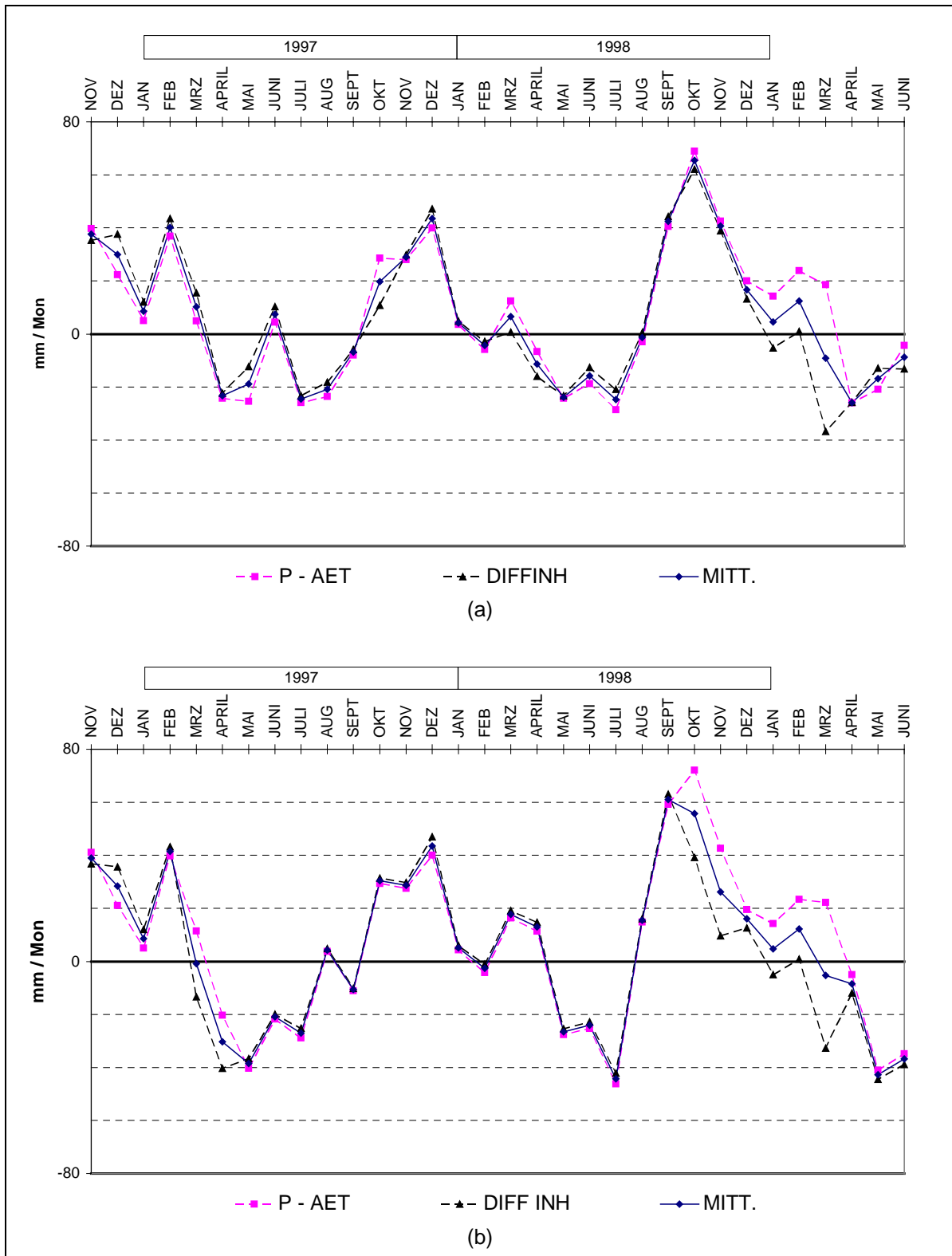
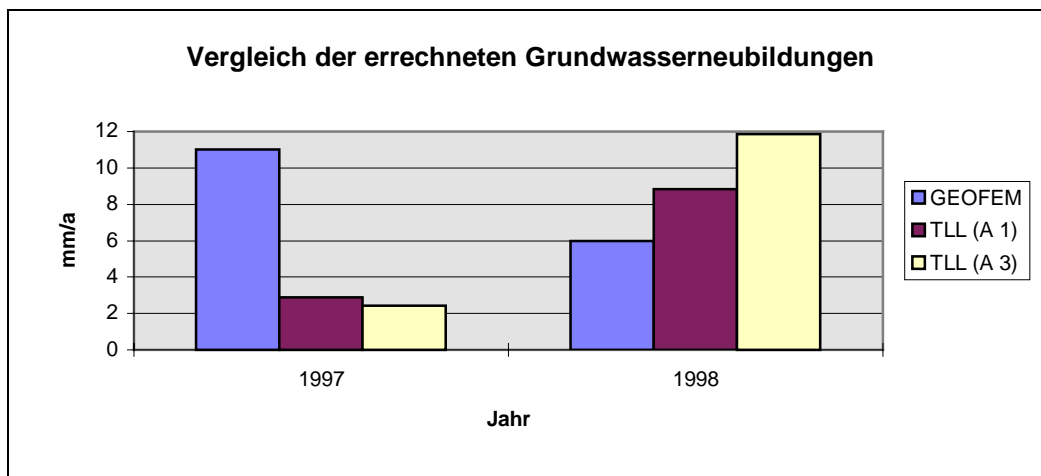


Abb. 3.4-6: Grundwasserneubildungsganglinien in der Aue

(a) - Lysimeter A 1

(b) - Lysimeter A 3

Die Jahressummen der beiden Grundwasserneubildungsberechnungen im Vergleich sind in Abb. 3.4-7 dargestellt.

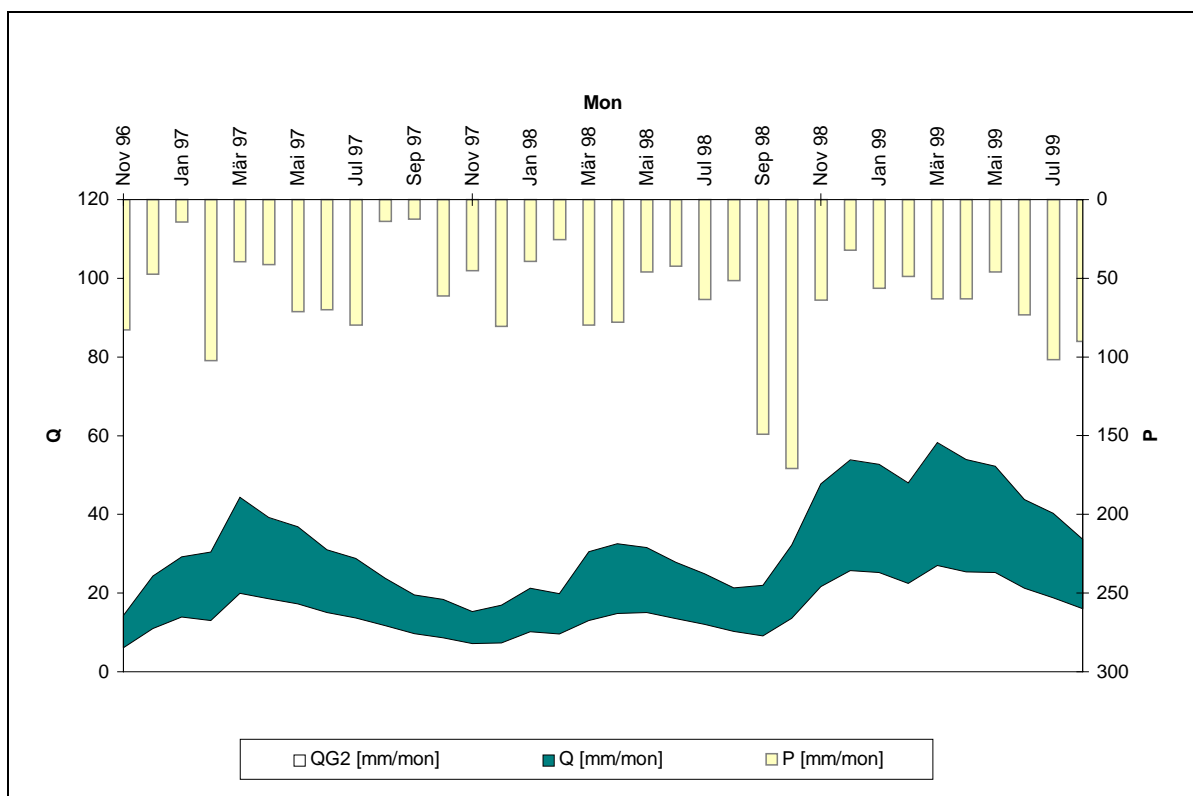


**Abb. 3.4-7: Vergleich der Grundwasserneubildungsberechnungen**

**TLL (A1)** und **TLL (A3)** - Neubildungsberechnungen der TLL (Jahres-summe) mit dem Programm VERD an den Lysimetern A1 und A3 (s. S. 38).

Dem innerjährlichen Gang wurden für die *Speisungsgebiete* die Ergebnisse einer Wasserhaushaltsberechnung mittels des Programmsystems AKWA-M (MÜNCH, 1995b) zugrundegelegt. Diese Berechnung erfolgte im Rahmen einer Zusammenarbeit im Forschungsverbund Elbe-Ökologie mit der TU Dresden, Institut für Meteorologie und Hydrologie (s. Kap. 3.4.6). Die ausführliche Ergebnisbeschreibung dieser Berechnung ist in Anhang 2 beigegeben. Für den Untersuchungszeitraum Nov. 1996 bis August 1999 ergibt sich die in Abb. 3.4-8 dargestellte Grundwasserneubildungsganglinie.

Als Grundwasserneubildung wurde die Größe QG2 angenommen. Diese ergibt sich in dem Programm AKWA-M durch eine programminterne Separation aus QPERK (Perkolation) abzüglich eines schnell abfließenden Anteils QG1, der dem Nebenfluß der Unstrut zuströmen kann. Es wird davon ausgegangen, daß der Anteil QG2 das System des Keupers speist.



**Abb. 3.4-8: Wasserhaushaltsgrößen im Einzugsgebiet des Nordmars (Speisungsgebiet)**

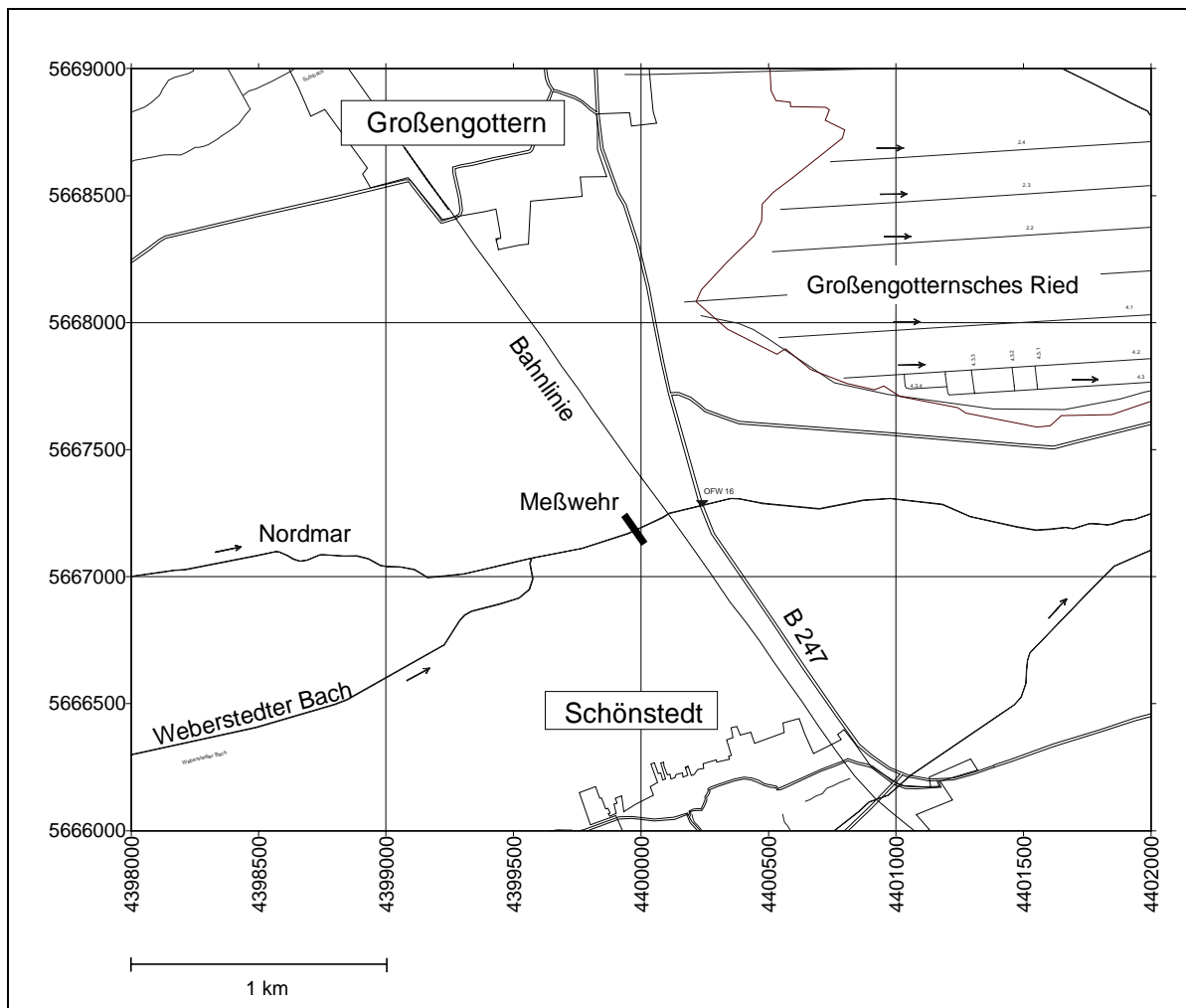
Q - Abfluß gesamt; QG2 - Grundwasserneubildung; P - Niederschlag

### 3.4.6 Modellierung der Abflußkomponenten (AKWA-M)

Die mittels dem Berechnungsmodell GEOFEM ermittelte Grundwasserneubildung stellen nur langjährige Mittelwerte dar. Zu Abbildung der Grundwasserdynamik mittels instationärer Modellrechnung sollten jedoch auch Werte der Grundwasserneubildungsdynamik in den Speisungsgebieten herangezogen werden. Um **für die Speisungsgebiete** die Ganglinie der Grundwasserneubildung zu ermitteln, wurden in Zusammenarbeit mit dem Institut für Hydrologie und Meteorologie der TU Dresden mittels des Rechenprogramms AKWA-M (MÜNCH 1994) für das ca. 25 km<sup>2</sup> große Einzugsgebiet des Nordmar die Abflußkomponenten ermittelt (LIEBER, 1999).

Bei diesem Programm handelt es sich um ein Einzugsgebietsprogramm, das dazu dient, mittlere und aktuelle Bilanzen des Wasserhaushaltes zu erstellen. Es geht von einer Abflußkomponentenseparierung nach dem Ansatz des DIFGA (SCHWARZE 1985) aus (s. DYCK u. PESCHKE, 1995). Das Programm wurde vor allem für kleinere Einzugsgebiete im Mittelgebirgsraum (bis 200 km<sup>2</sup>) entwickelt und erlaubt die Berechnung von Wasserbilanzen. Es basiert auf konzeptionellen Ansätzen und kann bis auf Tagesschritte aufgelöst werden. Die Berechnungsergebnisse können zu Monats-, Halbjahres- und Jahresbilanzen zusammengefaßt werden. Das Gebiet wird dabei in sog. Hydrotope

eingeteilt. Simuliert werden der Gang der Bodenfeuchte, die Grundwasserneubildung und die Schneedeckengenese (MÜLLER 1994).



**Abb. 3.4-9: Lage des Wehres Nordmar zwischen Großengottern und Schönstedt**

Als Eingangsdaten benötigt das Programm folgende Eingangsdatensätze (LIEBER 1999):

- Parametersatz, der das Einzugsgebiet physisch beschreibt (Gebietsdaten),
- im erforderlichen Zeitintervall vorliegende meteorologische Daten, die als Prozeßdatei den Input in das hydrologische System darstellen,
- Testdaten zur Eichung des Modells und Bestimmung der Güte.

Auf Grund der *Gebietsdaten* Vegetation, Bodenform, Lithofaziesseinheiten und Nutzungsformen wurde das 25,04 km<sup>2</sup> große Einzugsgebiet in 56 Teilflächen gegliedert. Da das Einzugsgebiet fast vollständig auf dem Gebiet der Agrargenossenschaft Mülverstedt e.G. liegt, konnte auch die Landnutzung von Januar 1981 bis Dezember 1996 erfaßt werden.

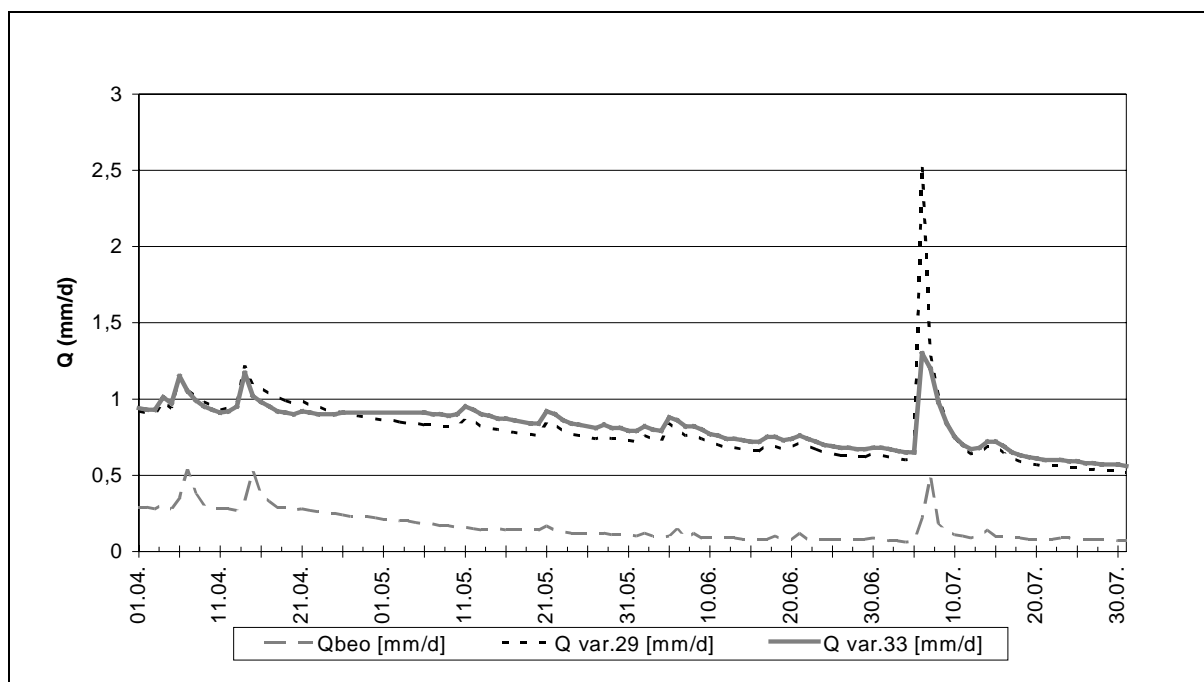
Als *Prozeßdaten* wurden die Niederschlagsdaten der Stationen Weberstedt und Kammerforst genutzt. Die Temperatur- und Feuchtedaten sowie die Sonnenscheindauer lagen von der Station Erfurt Bindersleben als nächstliegende Station vor.

Als **Testdaten** wurden Ergebnisse einer Pegelmessung am Einzugsgebietsausgang genutzt. Dazu wurde im März 1999 ein temporäres Wehr errichtet (s. Abb. 3.4-9) und mittels Drucksonde im 15-min-Takt vom 1. 4. 1999 bis 18. 8. 1999 der Wasserstand des Nordmar gemessen. Daraus wurden Tagesmittelwerte ermittelt.

Diese Messungen sind aus zwei Gründen als kritisch zu bewerten:

- Die Bauart des Wehrs gestattete keinen 100 %ig umströmungsfreien Überfall. Zwar wurde eine durch VEB Hydrogeologie im Zuge der DE Dingelstädt (TREFFURT 1985) errichtete Meßstelle wieder reaktiviert, jedoch kam es im Laufe der Zeit zur Umströmung über Wurzelkanäle, die auch durch nachträgliche Dichtungsmaßnahmen nicht unterbunden werden konnten. Um den Fehler der Wasserstandsmessungen zu minimieren, wurde bei jeder Auslesung des Datenloggers eine Durchflußmessung oberhalb und unterhalb des Wehres durchgeführt.
- Die Meßzeit war von Februar 1999 bis August 1999. Es konnte auf Grund dieses Zeitintervalls kein vollständiges hydrologisches Jahr abgebildet werden.

Die Modellkalibrierung konnte auf Grund der Kürze der Meßreihe (4 Monate ohne Winterperiode) nur bedingt als Anpassung der Durchflußmengen an eine gemessene Ganglinie vorgenommen werden. So wurde das Ziel der Eichung vor allem in der Einhaltung der für das Einzugsgebiet typischen Jahresbilanzen gesehen.



**Abb. 3.4-10: Vergleich des gemessenen Abflusses mit den simulierten Abflußmengen**

**Var. 29** - ohne Lannutzungsdynamik / ohne Perkolationsansatz

**Var. 33** - mit Lannutzungsdynamik / mit Perkolationsansatz

**$Q_{\text{beo}}$**  - beobachteter Abfluß

**$Q_{\text{var.*}}$**  - berechneter Abfluß (Variante 19 und 33)

Im Ergebnis des Tests mit der kurzen eigenen Meßreihe zeigt sich, daß der simulierte Abfluß größer ist als der gemessene (s. Abb. 3.4-10). Dafür können zwei Ursachen gesehen werden: zum einen gab es bautechnische Probleme mit dem Wehr, die dazu führten, daß es zur Umströmung kam. Die zweite Ursache ist geologisch bedingt. Es ist davon auszugehen, daß es zu einer längerfristigen Abflußkomponente im verkarsteten Gipskeuper kommt, die durch das Wehr am Nordmar nicht erfaßt wird.

Aufgrund der Langfristigkeit unterirdischer Fließprozesse im Grundwasser wurden die monatlichen Grundwasserneubildungswerte als Modelleingangsgröße genutzt und die Grundwassermodellierung mit Monatsschritten gerechnet (s. Kap. 3.4.7).

### **3.4.7 Eichung des Grundwassermodells**

#### **3.4.7.1 Stationäre Eichung und Bewertung der Wasserstände**

Die stationäre Eichung des Grundwassermodells wurde an dem Systemzustand Mai 1998 vorgenommen. In Anlage I/3-5 sind die Isohypsen des gemessenen Zustandes mit dem Berechnungsergebnis dargestellt. Die Abbildung 3.4-11 zeigt die Gegenüberstellung der Meß- und Berechnungsergebnisse an den gemessenen Grundwassermeßstellen. Aus dieser Gegenüberstellung wird deutlich, daß die Berechnungsergebnisse eine durchschnittliche Abweichung von - 32 cm zu den gemessenen Grundwasserständen aufweist. Diese Abweichung ist damit zu begründen, daß zum Zeitpunkt der Modelleichung die Ergebnisse der realen Grundwasserneubildung zum Eichzeitpunkt nicht vorlagen und mit den langjährigen Mittelwerten der Grundwasserneubildung gerechnet werden mußte.

Ein weiterer Sachverhalt muß bei der Interpretation der Modellergebnisse ebenfalls berücksichtigt werden. Die Auswertung der Ganglinien der Staatlichen Meßstellen ergab, daß der Mittelwert der Grundwasserstände im Projektjahr 1998 an der Meßstelle 0760 in Altengottern um 40 cm tiefer lag als das langjährige Mittel der Wasserstände der Jahresreihe 1955/1998. Somit bilden die im Projektzeitraum gemessenen und durch die Modellierung prognostizierten Wasserstände einen niedrigeren Grundwasserstand als im langjährigen Zustand ab.

Bei der Interpretation von Mittelwerten gemessener Wasserstände ist weiterhin zu berücksichtigen, daß der gleitende Mittelwert im Projektzeitraum angestiegen ist. In diesem Fall liegt jeder Meßwert umso mehr unter dem Mittelwert aller Meßwerte, je früher er gemessen wurde. In Abbildung 3.4-12 ist die Entwicklung der Mittelwerte über den Projektzeitraum für ausgewählte Meßstellen in der Aue dargestellt.

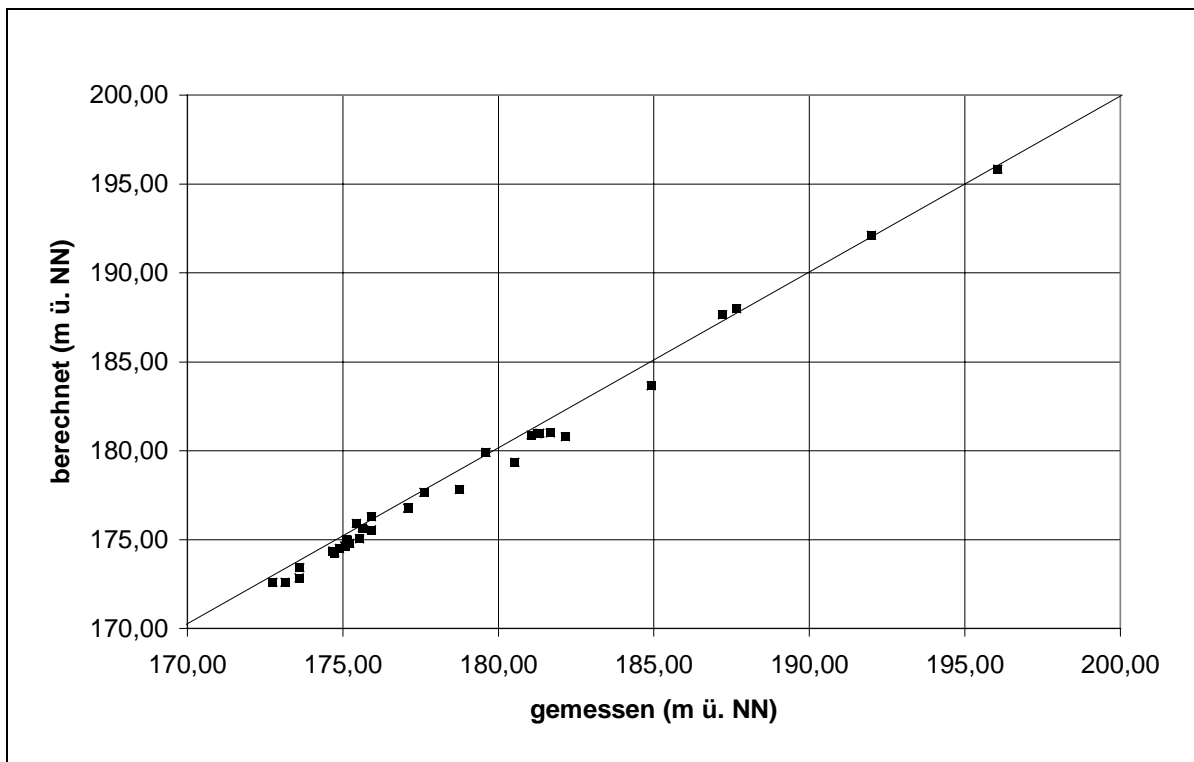


Abb. 3.4-11: Ergebnis der stationären Modelleichung

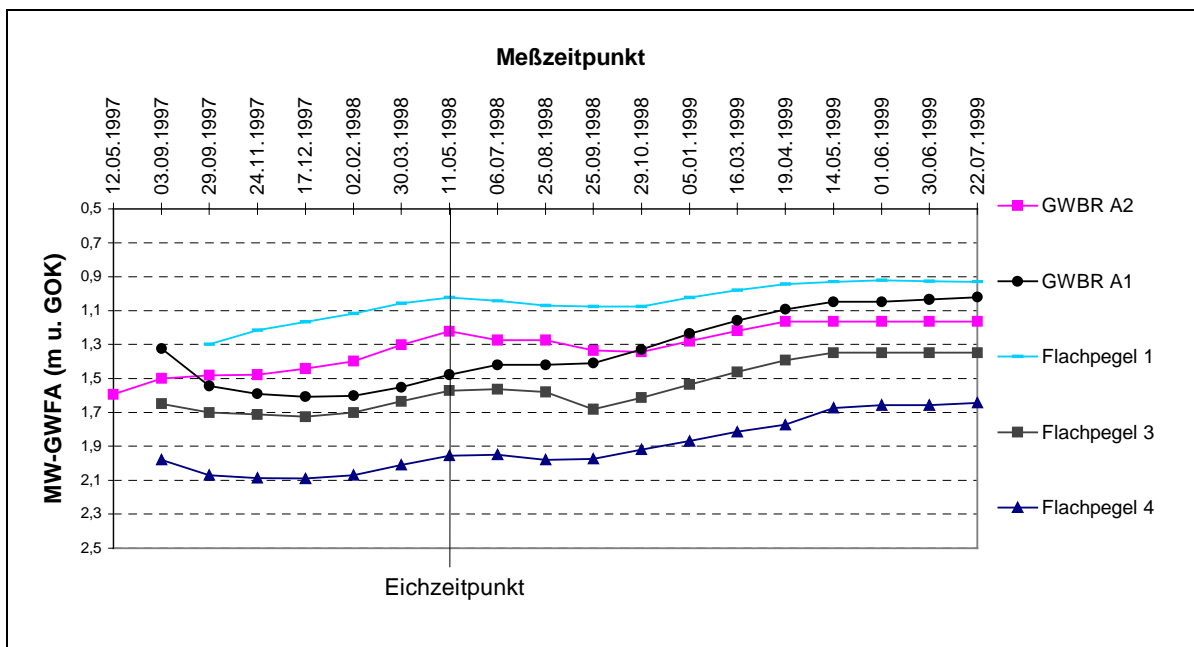


Abb. 3.4-12: Mittelwertentwicklung der gemessenen Grundwasserstände

MW-GWFA - Mittelwert der Grundwasserflurabstände

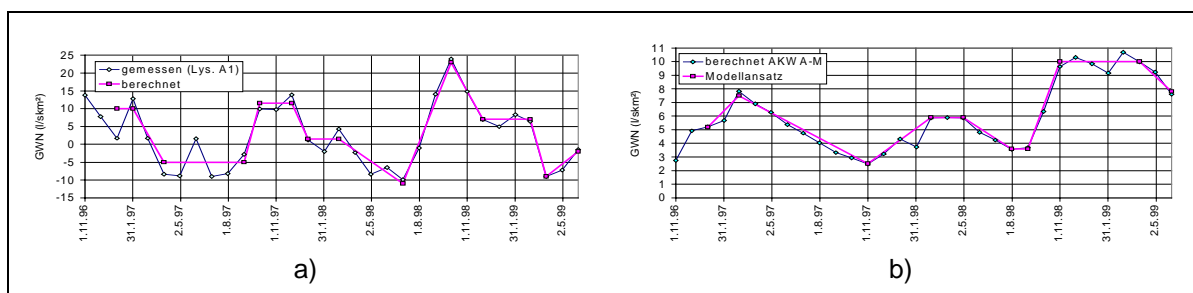
### 3.4.7.2 Instationäre Eichung

Die instationäre Modelleichung hatte neben dem Ziel, das zeitliche Systemverhalten zu erfassen, auch die Aufgabe, die Sensitivität der inneren Randbedingungen "Grundwasser-Neubildung" und "Unstrut" zu quantifizieren. Speziell für die Erfassung des innerjährlichen Gangs der Grundwasser-Neubildung wurde das Berechnungsprogramm MINIHO insofern erweitert, daß es jetzt relativ unkompliziert möglich ist, gebietsspezifische Neubildungsganglinien zu berücksichtigen. Diese Erweiterung war deshalb erforderlich, weil im Untersuchungsgebiet mindestens zwei Einheiten zu unterscheiden waren, die eine ganz verschiedene Charakteristik der Grundwasser-Neubildung aufweisen:

- die Unstrut-Aue und die Riedflächen mit teilweise sehr flurnahen Grundwasserständen
- die Areale nördlich und südlich der Aue (allgemein als Speisungsgebiete deklariert), in denen die Grundwasserstände als flurfern (> 2 m) eingestuft werden können.

Wie die Berechnungen der langjährigen Grundwasserneubildung mittels des Programmsystems GEOFEM zeigen, ist diese im Jahresdurchschnitt in der Unstrut-Aue vergleichsweise gering (weniger als 2 l/s·km<sup>2</sup>), wogegen in den Speisungsgebieten Werte > 4 l/s·km<sup>2</sup> anzusetzen sind. Aus den Lysimetermessungen des TP 2 ergab sich für die Aue eine sehr ausgeprägte Dynamik der Neubildung, die im Sommer auch zu einer Zehrung führt

(s. Kap. 3.4.5). Die Abb. 3.4-13a zeigt die gemessene Ganglinie der Grundwasserneubildung in der Aue und die für das Modell vorgenommene Approximation. Die Ganglinie für die Speisungsgebiete wurde aus den AKWA-M-Berechnungen gewonnen, wobei als Grundwasser-Neubildung die Berechnungsgröße QG2 angesetzt wurde. Die Abb. 3.4-13b zeigt die so ermittelte Ganglinie. Im Gegensatz zur Unstrut-Aue treten hier zu keiner Zeit Zehrungen auf.

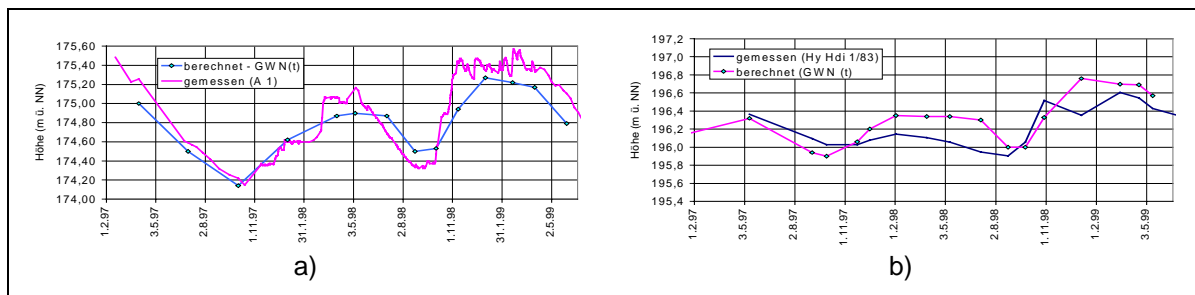


**Abb. 3.4-13: Modellganglinien der Grundwasserneubildung in Unstrut-Aue und Speisungsgebiet**

a) - Unstrut-Aue; b) - Speisungsgebiet

Die Berechnungsergebnisse mit den so angesetzten Neubildungsfunktionen sind exemplarisch für die Meßstellen A1 (Unstrut-Aue) und HyHdi 1/83 (Speisungsgebiet) in der Abb. 3.4-14 dargestellt.





**Abb. 3.4-14: Instationäre Modelleichung an Meßstellen der Aue und des Speisungsgebietes**

a) - Unstrut-Aue; b) - Speisungsgebiet

Die Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung ist vergleichsweise sehr gut. Es ließ sich auch modellseitig bestätigen, daß die Grundwasserstände im Holozän der Aue offensichtlich sehr stark von der Grundwasser-Neubildung und weniger von der Unstrut abhängen.

### 3.4.8 Berechnungsszenarien

Nach der **Eichung des Modells** anhand des Systemzustandes Mai 1998 und der Durchflußmessungen im gleichen Zeitraum wurden die in Abstimmung mit den Teilprojekten IV und VII erarbeiteten Entwicklungsalternativen als Grundlage für die Berechnungsszenarien verwendet. Die Szenarien sind hinsichtlich der Randbedingungen Unstrut und Gräben in Tabelle 3.4-2 zusammengestellt.

Die äußeren Randbedingungen sowie die mittels GEOFEM berechnete Grundwasserneubildung wurde bei den stationären Berechnungen wie in Abschnitt 3.4.4 beschrieben für alle Varianten angesetzt.

Für die Szenarien 1 - 3 wurde der Unstrutverlauf entsprechend des von BCE (1998) für den Ist-Zustand eingemessenen Längsprofil angesetzt.

Für die Szenarien 4, 5 und 6 wurden die Unstruthöhen der unter Anwendung einer 1-D-Simulation der in das Geländetiefste verlegten Unstrut (BCE 1998) vom Teilprojekt 7 - Gewässer- und Auenentwicklung - vorgegeben (NEFF u. REISINGER 2000).

Dabei wurden jeweils die Gewässerhöhen, die von BCE übergeben wurden, als innere Randbedingung für die Berechnungen angesetzt. Die Sohle wird als kolmatiert betrachtet, wenn sie infiltriert, und als unkolmatiert, wenn sie exfiltriert (d.h. als Vorfluter für das Grundwasser fungiert).

Tabelle 3.4-2: Hydraulische Randbedingungen der Berechnungsszenarien

EA / Varainate	Bezeichnung	RB Unstrut	RB Gräben
1	Ist-Zustand	kanalisiert / mit Staustufen	vorhanden entspr. Ist-Zustand
2	ANP1	kanalisiert / mit Staustufen	vorhanden entspr. Ist-Zustand
3	ANP2	kanalisiert / mit Staustufen	vorhanden entspr. Ist-Zustand
3 / 3.1	”angestauter Nebenkanal”	kanalisiert / mit Staustufen	ohne Gräben im Altengott. Ried / Nebenkanal 1.1 angestaut
3 / 3.2	”verlegter Welsbach”	kanalisiert / mit Staustufen	ohne Gräben im Altengott. Ried Welsbach durch das Altengott. Ried verlegt
4	konfliktgeminderte EA	zwischen Altengottern und Thamsbrück mäandrierten Altarme der Unstrut	Gräben im Großengott, Ried verkürzt bzw. verfüllt
4 / 4.1	”ohne Altarme”	zwischen Altengottern und Thamsbrück mäandrierten keine Altarme der Unstrut	Gräben im Großengott, Ried verkürzt bzw. verfüllt Altengott. Kanal verkürzt / keine Gräben im Altengott. Ried
5 + 6	gewässerökologische und naturschutzfachliche EA	zwischen Bollstedt und Thamsbrück mäandriert	Gräben im Großengott, Ried verkürzt bzw. verfüllt

Die Ergebnisausgabe erfolgt als **Druckspiegelhöhen** bei MW - in NN-Höhe. Diese Ergebnisse wurden elementweise mit der Geländehöhe verschnitten, so daß Karten der Druckspiegelhöhen bei Mittelwasser (**in m u. GOK**) erstellt wurden.

Zur flächenhaften Darstellung wurden die Ergebnisse nochmals in ein 100 x 100 m -Raster interpoliert.

Für Mittelwasserverhältnisse wurden zunächst verschiedene Varianten der Anbindung des entstehenden, kanalisiert Unstrutaltarms an die neue, mäandrierte Unstrut in Ansatz gebracht. In der gewässerökologischen und der naturschutzfachlichen Entwicklungsalternative (EA 4 und 5+6) sind diese alten Unstrutarme als Altarme (JÜRGING U. GRÖBMAIER 1998) mit Anbindung im Unterstrom in die Unstrut angesetzt und in diesen Szenarien in das Modell als innere Randbedingung gesetzt.

Als Modifikation wurde für die Entwicklungsalternative 4 eine Variante (4.1) gerechnet, in der die Unstrutaltarme vollständig verfüllt und zusätzlich der Altengotternsche Kanal verkürzt wurde.

### 3.5 Zusammenfassung der Untersuchungsmethodik

Es wurden *zwei Gebiete* näher untersucht. Das Hauptuntersuchungsgebiet liegt zwischen Bollstedt und Thamsbrück, in der Langensalza - Mühlhäuser Teilmulde. Ausgangspunkt für die Abgrenzung des Untersuchungsgebietes ist der hydrogeologische Aufbau des Thüringer Beckens zwischen Mühlhausen und Bad Langensalza, mit den grundwasserführenden Schichten des verkarsteten Gipskeupers im Untergrund der Auensedimente.

Als *Feldarbeiten* wurden zur näheren Erkundung der hydrogeologischen Verhältnisse zu Beginn des Projektes Drucksondierungen in der Aue durchgeführt und drei Grundwassermeßstellen abgeteuft. Entlang eines Profils der Drucksondierungen wurden multi-level-Grundwassersammler eingerichtet, die die teufenorientierte Beprobung des Auensedimentes gestatteten. Im weiteren Projektablauf wurden insgesamt 15 Flachpegel zur Überwachung der flurnahen Grundwasserstände im Altengotterschen und Großengotterschen Ried gesetzt. Zur Erfassung des hydrochemischen Regimes sind im Hauptuntersuchungsgebiet insgesamt 38 Grund- und Oberflächenwassermeßstellen bis zu 6 mal beprobt worden. Im Untersuchungsgebiet Sömmerda wurde an Oberflächengewässern zusätzlich eine Leitfähigkeitskartierung vorgenommen. An den Oberflächengewässern wurden in beiden Untersuchungsgebieten Durchflußmessungen durchgeführt. Im Hauptuntersuchungsgebiet wurde im Projektjahr 1999 zusätzlich eine Oberflächenwassermeßstelle zur kontinuierlichen Durchflußmessung eingerichtet. Diese Meßwerte gingen in ein Einzugsgebiets-Abflußmodell ein.

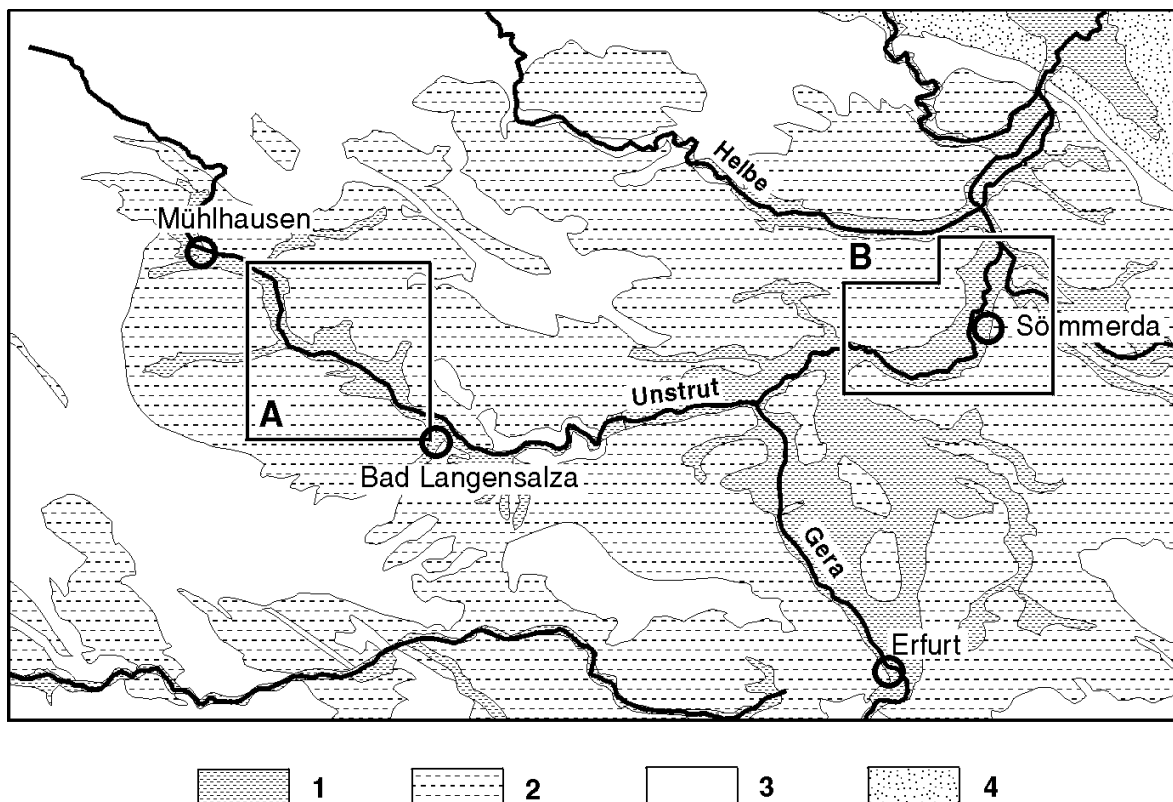
Die *Laborarbeiten* hatten zwei Schwerpunkte. Zum einen waren die Grund- und Oberflächenwässer kontinuierlich zu analysieren. Dazu wurde für die einzugsgebietsweite Beprobung ein großes Analysenprogramm mit den geogenen und zu erwartenden anthropogenen Hauptinhaltsstoffen durchgeführt. An den Proben der Grundwassersammler aus dem Auensediment wurde ein kleineres Programm, mit den wichtigsten geogenen und anthropogenen Inhaltsstoffen durchgeführt. Prozeßuntersuchungen wurden in Form von Batchversuchen und einem Säulenversuch durchgeführt. Die Batch-Versuche dienten der Bestimmung der Denitrifikationsrate im Grundwasser-Sediment-Gemisch. Die Versuche wurden an den Auensedimenten Torf und schluffiger Ton vorgenommen. In der Säule wurde das natürliche Auenprofil nachgebildet und mit natürlichen Grundwässern verschiedener Herkunft durchströmt.

Die *Modellierung* wurde auf der Basis eines hydrogeologischen Strukturmodells, das die Grundwasserleiter Gipskeuper, Pleistozän und dreifach gegliedertes Holozän beinhaltet, mit dem Programm MINIHO durchgeführt. Dieses Programm dient der Simulation der horizontalebene Grundwasserbewegung in einem Grundwasserleitersystem auf der Basis einer unregelmäßigen Rechtecknetz-Diskretisierung. Die Eichung des Modells wurde sowohl stationär an dem Meßzustand Mai 1998 als auch instationär vorgenommen. Die instationäre Modelleichung hatte neben dem Ziel, das zeitliche Systemverhalten zu erfassen, auch die Aufgabe, die Sensitivität der inneren Randbedingungen "Grundwasser-Neubildung" und "Unstrut" zu quantifizieren. Durch die Variierung der Grundwasserneubildung im Speisungs- und Entlastungsgebiet ergaben sich für beide Einheiten hinreichend genaue Anpassungen. Für die Szenarienrechnungen wurden die Entwicklungsalternativen zugrundegelegt. Sie ließen sich in drei hydraulische Grundszenerien zusammenfassen: EA 1 - 3: Unstrut-Verlauf entsprechend dem Ist-Zustand; EA 4: Unstrutverlauf teilmäandriert (zwischen Altengotten und Thamsbrück) sowie EA 5 + 6: Unstrutverlauf vollmäandriert (von Bollstedt bis Thamsbrück).

## 4 Untersuchungsergebnisse

### 4.1 Geologie der Untersuchungsgebiete

Wie bereits in Kap. 3.1 ausgeführt wurden Grundwasserströmungs und -beschaffenheitsverhältnisse in zwei *Untersuchungsgebieten* des Unstruttals näher untersucht. Bei dem Hauptuntersuchungsgebiet (A) handelt es sich um zwei ausgedehnte Riedflächen (Altengotternsches und Großengotternsches Ried) im oberen Abschnitt der Unstrut, zwischen Mühlhausen und Bad Langensalza. Das Untersuchungsgebiet Sömmerda (B) liegt zwischen Wundersleben und Leubingen, in der Umgebung von Sömmerda (s. Abb. 4.1-1).



**Abb. 4.1-1: Geologische Übersichtskarte mit Untersuchungsgebieten**

1 - quartäre Talsedimente; 2 - Keuper; 3 - Muschelkalk; 4 - Buntsandstein

#### ***Hauptuntersuchungsgebiet Bollstedt bis Thamsbrück***

Das **Hauptuntersuchungsgebiet** liegt im Zentrum der herzyn angelegten Mühlhäuser - Langensalzaer Keupermulde. Diese ist eine Teilmulde der Thüringer Senke (Thüringer Becken), die sich aus Sedimenten der Trias aufbaut. (SEIDEL, 1995) Diese Senke wird von den Schichten des Oberen Muschelkalkes im Bereich des Hainichs im Westen, des Obereichsfeldes im Nordwesten und des Schlotheim-Grabens im Nordosten begrenzt

(SCHREIBER, 1989). Die Geländehöhen reichen hier von ca. 175 m NN in der Aue bei Thamsbrück über ca. 185 m NN in der Aue bei Bollstedt bis ca. 250 m NN als höchste Geländeniveaus des Keupers im Südwesten des Untersuchungsgebietes.

Das Liegende der Unstrut-Sedimente wird im Bereich zwischen Bollstedt und Thamsbrück von Gesteinen des mittleren Keupers gebildet. Zwischen Bollstedt und der Linie Großengottern - Altengottern bilden Schichten den **Schilfsandsteins (km2's)** die unmittelbare Basis der Auensedimente. Der Schilfsandstein streicht etwa auf der Linie Bollstedt - Ringmühle im Unstrutal aus, während er zwischen Ringmühle und Großengottern auch rechts der Unstrut noch anzutreffen ist. So steht die Staatliche Grundwassermeßstelle 0761 am Ortsausgang Großengottern in Richtung Altengottern im Schilfsandstein. Beim Schilfsandstein handelt es sich um fein- bis mittelkörnige Sandsteine, die grünlich-gelbe und z.T. violettrote Farben aufweisen (KAISER u. NAUMANN, 1905). Nordwestlich von Altengottern sind sie jüngst auch in grauen Farben, mit zahlreichen Pflanzeneinschlüssen erbohrt worden (mdl. Mitteilung Fa. Creaton). Zum Teil weist der Schilfsandstein in seinen unteren Teilen Schrägschichtung auf und beinhaltet dunkle, kohlig-tonige Lagen mit zahlreichem Pflanzenhäckseln (GRUMBT u.a. 1997). Der obere Teil des Schilfsandsteins (**km2'ts**) ist stark tonig-schluffig ausgebildet und wird nördlich Altengottern als keramischer Rohstoff für die Dachziegelindustrie abgebaut (KÄSTNER 1991).

Den größten Anteil der liegenden Keuperschichten im Unstruttal machen die Schichten des **Unteren Gipskeupers (kmUG)** aus. Dabei handelt es sich um Tonsteine, die insgesamt eine relativ eintönige Schichtenfolge darstellen (SEIDEL, 1995). Der basale Teil besteht aus den **unteren Gipsmergeln**, die die genetische Fortsetzung des Lettenkeupers darstellen. Diese Schichtenfolge enthält den sog. Grundgips, der im zentralen Teil des Thüringer Beckens auch hydrochemisch eine große Rolle spielt. Die darüberliegende **Bleiglanzbank** leitet zum **mittleren Gipsmergel** über. Dabei handelt es sich um Wechsellagerungen aus grünlichen und rötlichen Tonsteinen und Mergelsteinen, die ebenso zahlreiche Gipseinschaltungen enthalten. Diese Gipse wurden in der Bohrung Agt 3/97 von Beginn an aufgeschlossen.

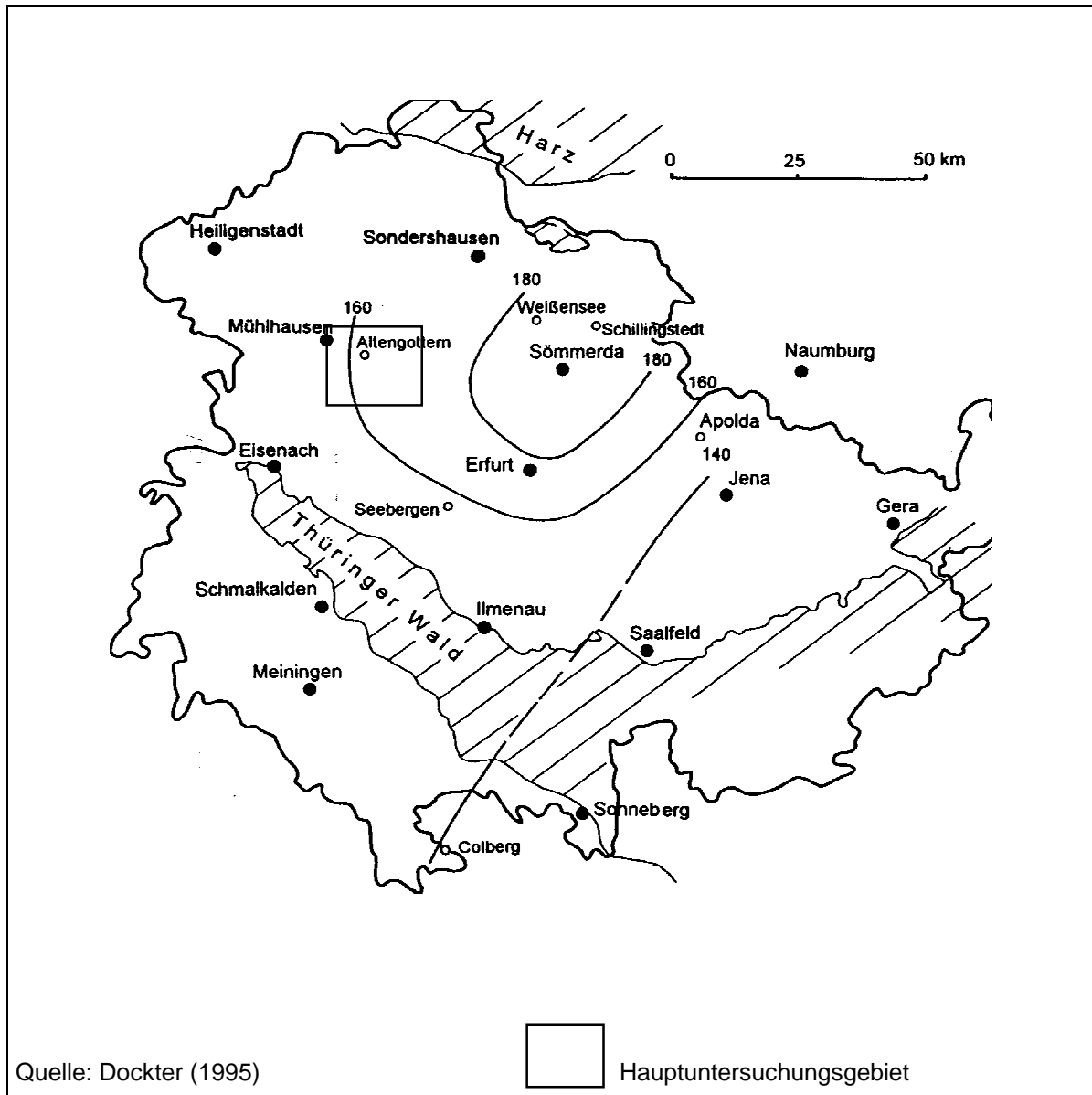
Die Wasserwegsamkeit des unteren Gipskeupers ist stark an seine Verkarstung gebunden. So sind in Schönstedt, Großengottern und Seebach zahlreiche Brunnen (Haus-, Notwasser- und Betriebsbrunnen) in den 70er und 80er Jahren in den Horizont den Gipskeupers abgeteuft worden. Die T-Werte dieser Brunnen sind in das Grundwasserleitermodell als Durchlässigkeitsparameter eingegangen.

Die eigenen Bohrungen Agt 1/97 u. Agt 2/97 haben diesen verkarsteten Anteil des Gipskeuper aufgeschlossen und sind in diesem Bereich verfiltert worden. Er bestand aus graugrünen, z.T. rötlich durchzogenen, meist kalkfreien Tonsteinen, die auf Klüften mit Gips besetzt waren. Die Kerne waren bis in eine Teufe von 20 m überwiegend bröcklig und kleinstückig. Dies zeigt die relativ gute Durchlässigkeit des Horizontes.

In der Bohrung Dgt 18/80 (Treffurt 1982) ist der Untere Gipskeuper mit einer Mächtigkeit von 161 m aufgeschlossen. Einen Überblick über die Mächtigkeitsverhältnisse des Unteren Gipskeupers im Thüringer Becken gibt die Abbildung 4.1-2.

Die **hydraulischen Verhältnisse** des tieferen Untergrundes werden stark von den Auslaugungsverhältnissen des triasischen Schichtkomplexes bestimmt. So konnte durch Treffurt (1982) nachgewiesen werden, daß in dem Bereich mächtiger Keuperbedeckungen der Muschelkalk keine Auslaugung erfuhr. An der Grenze der Keuper-Bedeckung hat sich

danach eine Permeabilitätsgrenze ausgebildet, die einerseits zahlreiche artesische Quellen entlang dieser Grenze hervorbringt, andererseits zu einem veränderten Chemismus des Grundwassers in den triasischen Sedimenten führt.



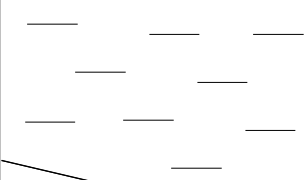
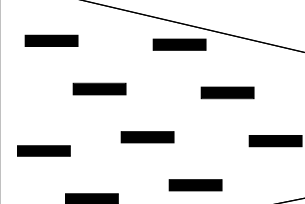
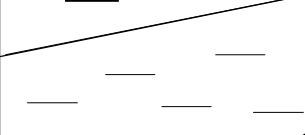
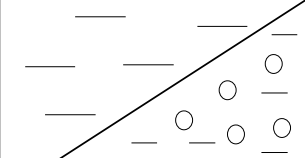
**Abb. 4.1-2: Mächtigkeitsübersicht des Unteren Gipskeupers in Thüringen**

Im *Ergebnis der Drucksondierungen* konnten die Schichtverhältnisse der *quartären Auesedimente* rekonstruiert werden. Dazu wurde anhand einer Grundwassermeßstelle des Teilprojektes II, die bis auf das Liegende abgeteuft wurde, die Sondierkurven geeicht.

Die Auswertung der Sondierkurven wird anhand des Verhältnisses aus Spitzendruck und Mantelreibung vorgenommen. Hierzu werden charakteristische Kennlinien verwendet, die empirisch ermittelt wurden.

In Anlage 4-8 ist das Profil III der Drucksondierungen dargestellt.

Es zeigt sich im Bereich der Untersuchungsflächen ein drei- bis vierschichtiger Aufbau des Auesedimentes, der sich generalisiert wie folgt darstellen läßt:

Schicht		Mächtigkeit
	Mutterboden	< 0,5 m
	Auelehme und -tone, z.T. mit Mudde	1,5 - 3,5 m
	Torf	1,5 - 2,5 m
	Auelehme und -tone	2,5 - 4,5 m
	Kies, tonig, schluffig	0 - 2,0 m

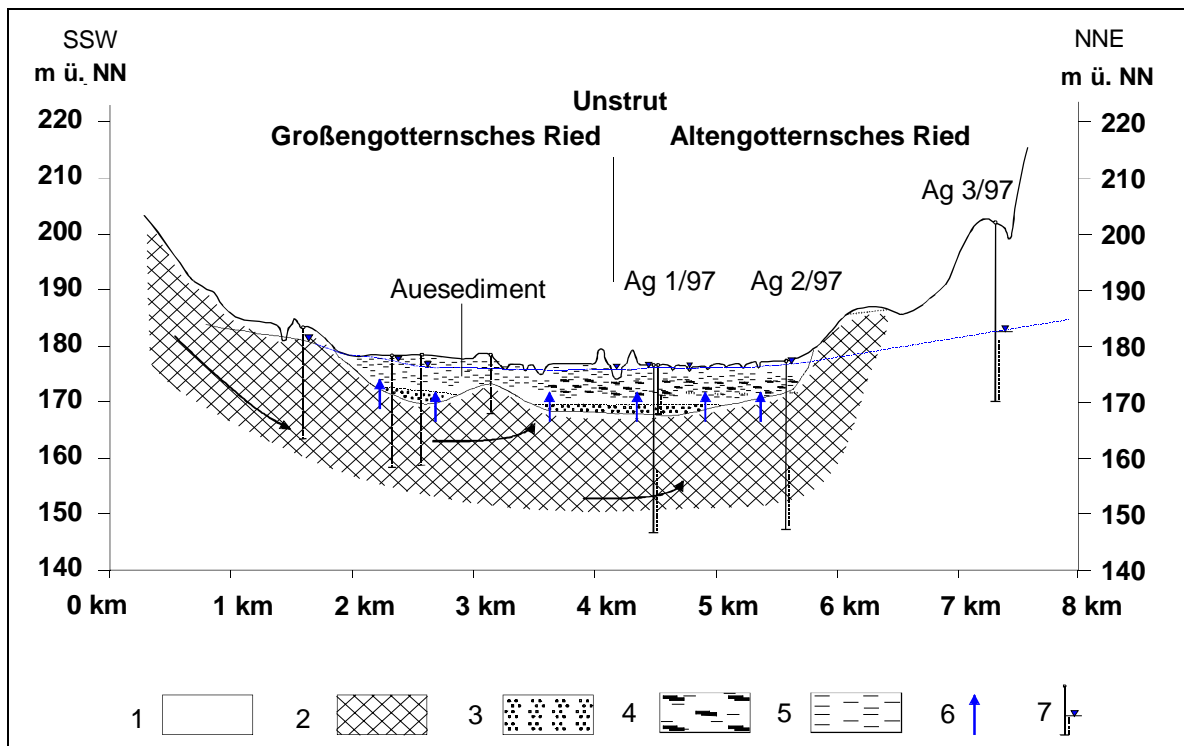
**Abb. 4.1-3: Generalprofil des Auensedimentes  
(Altengotternsches Ried)**

In der lateralen Schichtverbreitung zeigt sich jedoch ein differenziertes Bild. Die Schichten sind nicht über die gesamte Aue aushaltend und wechseln sowohl in ihrer Teufenlage als auch in der Mächtigkeit. Derartige Sedimentaufbauten sind Ergebnis einer wechselnden Dynamik des sedimentbildenden Gewässers.

Eine besondere hydraulische Bedeutung kommen den pleistozänen schluffig-kiesigen Sanden im Hauptuntersuchungsgebiet zu. Diese zwar nur 2 - 3 m mächtigen und nicht über den gesamten Talbereich aushaltenden Sedimente können eine stark entwässernde Funktion ausüben. In ihnen enlastet sich der Grundwasserdruck aus dem Keuper. Werden diese Sedimente durch den Vorfluter angeschlossen, kommt es zu einem basalen Zufluß aus dem Pleistozän in die Unstrut. Auf Grund der Sohlhöhe der Unstrut zwischen Altengottern und Thamsbrück muß dies dort angenommen werden, da die pleistozänen Sedimente nach den Ergebnissen der Drucksondierungen und der Bohrung Agt 1/97 bis auf ein Niveau oberhalb 169 m NN hinauf reichen.

Im Bereich der Drucksondierung II/4 und II/5 wurden sandig-kiesige Sedimente auch in Teufenlagen zwischen 1,5 und 3 m angetroffen. Hierbei kann es sich um Sedimente des alten Gewässerbettes des Welsbaches handeln, der vor Beginn der umfangreichen Flußbegradigungsmaßnahmen durch das Altengotternsche Ried in Richtung Südwesten auf die Unstrut zugeflossen ist.

Der generelle Aufbau des Unstruttales im Bereich zwischen Bad Langensalza und Mühlhausen ist in Abbildung 4.1-4 erkennbar.



**Abb. 4.1-4: Geologischer Schnitt durch das Unstruttal zwischen Bad Langensalza und Mühlhausen**

1 - Gipskeuper, unverkarstet; 2 - Gipskeuper, verkarstet; 3 - Quartär (Pleistozän, schluffige Kiese); 4 - Quartär (Holozän, Torfe und Mudden); 5 - Quartär (Holozän, Auelehme); 6 - GW-Strömungsrichtung; 7 - Forschungsbohrung

### *Untersuchungsgebiet Sömmerda*

Das Untersuchungsgebiet Sömmerda ist regionalgeologisch ebenso dem Thüringer Becken, speziell der Bleicherode-Stadtrodaer Scholle zuzuordnen. Die Sedimentgesteine des mittleren Keupers werden hier vor allem durch Sande und Kiese des Pleistozäns überlagert. Durch atektonische Absenkungen in Folge salinärer Auslaugungen wurden wesentliche Talstrukturen bereits präglazial angelegt (STEINMÜLLER, 1998).

Im Untersuchungsgebiet Sömmerda überwiegen die rolligen Sedimente im Profil der Talaue. Die Auswertung von über 100 Bohrungen in diesem Teil des Unstruttales ergab eine maximal 10 m mächtige Rinne der Niederterrasse, die bis wenige dm unter Gelände der Talaue reichen kann (HESSE, 1998, S. 19f).

Den generellen Schichtaufbau der Untersuchungsgebiete A und B, dargestellt sowohl anhand der verfügbaren Bohrungen als auch aus der Literatur (SCHREIBER, 1989; SEIDEL, 1995; HESSE, 1998) gibt Tabelle 4.1-1 wieder.

Die Abbildung 4.1-5 zeigt einen geologischen Schnitt durch das Arbeitsgebiet Sömmerda.



Tab. 4.1-1: Stratigraphische Tabelle der Untersuchungsgebiete

Stratigraphie		Symbol	Lithologie	Mächtigkeit (m)		GW-Führung / Bemerkung	
				A <sup>1</sup>	B <sup>1</sup>		
Quartär	Holozän	Qh	Auelehm, Mudden, Löß, Torf	6 - 10	0 - 2	im wassergesättigten Bereich geringe Dynamik	
	Pleistozän	Qp	Kiese, schluffig, tonig	0 - 2,5	0 - 10	gute Wasserführung	
Keuper	Schilfsandstein	km2					
	Untere Gipskeuperfolge	TGu / km1	Mergelsteine, Gipssteine, Gips, in Tieflagen Steinsalz	bis 160	bis 150	oberflächennah mäßiger Grundwasserleiter bereits einige Meter unter Flur Verhärtung und Versalzung	
	Lettenkeuperfolge	TLk / ku	Schluffsteine, Sandsteine, Dolomitbänke	12 - 65	60	leitender Horizont; Verhärtung in den Tieflagen	
Muschelkalk	Hauptmuschelkalkfolge	Ceratitenschichten	THm2 / mo2	Mergelstein, Tonstein, Kalkbänke	43 - 100	60	guter Grundwasserleiter, bei Gesteinsüberdeckung versalzene GW
		Trochitenkalkfolge	THm1 / mo1	massiger Kalkstein	7 - 9		
	Anhydritfolge	Oberer Dolomit	TAy2 / mm5	mergelige Dolomite	10 - 20	60 - 100	überwiegend GW-Stauer, z.T. versalzene und verhärtete GW
		restliche Stufen der Anhydritfolge	TAy1 / mm1 bis mm4	Mergelsteine, Dolomite, Tonsteine, Anhydrit, Gips, in Tieflagen Steinsalz	25 - 100		
	Wellenkalkfolge		TWI / mu	flaseriger Mergelkalk, Kalksteinbänke	75 - 120	100	nicht relevant im UG

<sup>1</sup> Untersuchungsgebiet (s. Abb. 4.1-1)

Als erstes Ergebnis der zum Projektabschluß noch laufenden Diplomarbeit zur den hydrogeologischen Verhältnissen des *Gebietes um Artern* kann ein geologischer Schnitt vorgelegt werden. Auffällig ist hier, daß die quartären Talsedimente (Sande und Kiese) Mächtigkeiten bis zu 80 m annehmen können (s. Abb. 4.1-6).

**Abb. 4.1-5: Geologischer Schnitt durch das Untersuchungsgebiet  
Sömmerda**

**Abb. 4.1-6: Geologischer Schnitt durch das Unstruttal bei Artern**

## 4.2 Grundwasserdynamik

### 4.2.1 Ist-Zustand

Bei der Darstellung der Grundwasserdynamik in der Aue zwischen Bollstedt und Thamsbrück wurde auf die Stichtagsmessungen im Untersuchungsgebiet und auf die Daten der Logger in den Meßstellen Ag 1/97o (Pleistozän), Ag 1/97u (Keuper), Ag 2/97 (Keuper) sowie auf die von TP 2 übergebenen Daten der Logger an den Lysimetern A1, A2 und A3 zurückgegriffen.

Bei der Auswertung der Daten wurde im wesentlichen folgenden Schwerpunktfragen nachgegangen:

- Welchem Zuflußregime unterliegt das Grundwasser aus den Speisungsgebieten?
- Wie unterschieden sich die Zuflüsse aus Südwesten des Untersuchungsgebietes von denen im Nordosten?
- Welches Speisungsgebiet ist für die Aue relevant.
- Wovon sind die Grundwasserstände in der Aue abhängig.

Das *generelle Zuflußregime* ergibt sich aus den Isohypsenplänen, die auf der Grundlage der Stichtagsmessungen August 1998 (Anlage I/4-2.1) und März 1999 (Anlage 4-3.1) erstellt wurden. Diese Stichtage wurden gewählt, da es sich jeweils um den Tiefstand (August 1998) und den Höchststand (März 1999) des Grundwassers im Beobachtungszeitraum handelt.

In den Isohypsenplänen wurden sowohl Keupermeßstellen (außerhalb der Unstrutaue) als auch Quartärmeßstellen (innerhalb der Unstrutaue) einbezogen. Dieser Darstellungsweise liegt die Überlegung zugrunde, daß, wie an den Verhältnissen am Pegel Agt 2/97 nachgewiesen, der Keuper in die quartären Deckschichten und letztendlich in die Oberflächengewässer entlastet.

Anhand der dargestellten Isohypsenpläne wird deutlich, daß der Hauptzustrom aus Südwesten in das Unstruttal gelangt. Als lokale entlastende Elemente konnten die rechtsseitigen Unstrut-Zuflüsse Felchtaer-Bach, Seebach, Suthbach oberhalb der Großengotternschen Talsperre und Orlbach nachgewiesen werden. Für den Nordmar fehlten entsprechende Meßstellen, hier müssen in Analogie zu den anderen Zuflüssen aber entsprechende Verhältnisse mit entlastender Funktion des Nordmars angenommen werden.

Die Entlastungsflächen Altengotternsches und Großengotternsches Ried sind anhand der Plateaus auf einem Niveau zwischen 174,0 und 175,0 m NN deutlich erkennbar.

Ein wesentlicher Zustrom aus dem nördlichen Bereich ist aus geologischen Gründen nicht zu erwarten. Der untere Gipskeuper, der zwischen Altengottern und Thamsbrück für die Grundwasserführung im Liegenden verantwortlich ist, zeigte sich in der Bohrung Agt 3/97 als wenig verkarstet und hatte in dieser Bohrung bis 30 m u. GOK (ca. 170 m NN) keine nennenswerte Grundwasserführung. Erst unterhalb dieses Niveaus wurde Grundwasser angetroffen. Dabei kann es sich bereits um aus dem liegenden Lettenkeuper aufsteigendes Grundwasser handeln.

Der darüberlagernde Schilfsandstein, der zwischen Bollstedt und Großengottern im Unstruttal ausstreicht, erhält durch seine hangende tonig-schluffige Fazies, die am Roten Berg von Großengottern ansteht, kaum eine Speisung von Norden (s. Schnitt 2, Anlage I/4-4.2). Das aus diesem Horizont in die Unstrutaue aufdringende Grundwasser muß demnach

auch seine hauptsächlichliche Speisung aus dem westlichen Gebiet bekommen. Neuere Aufschlüsse für die Tongrube Altengottern (Fa. Creaton), die im Berichtsjahr erst abgeteuft wurden, könnten hierüber Auskunft geben.

Im Südwesten des Untersuchungsgebietes fällt vor allem der Einfluß der Talsperre Großengottern auf. Für die Talsperre selbst lagen keine Meßwerte vor, deshalb wurden die in der Topographischen Karte 1 : 10.000 angegebenen langjährigen Mittelwasserstände für die Darstellung zugrundegelegt.

Da für die ökologischen Fragestellungen die **Grundwasserflurabstände** in der Aue von entscheidender Bedeutung sind, wurde ein Weg gesucht, diese flächendeckend darzustellen. Dazu mußte ein Weg gesucht werden, das digitale Höhenmodell (s. Kap. 3.4.3) mit den Grundwasserständen zu verschneiden und danach flächendeckend darzustellen. Dazu wurde in Abstimmung mit dem TP VI (GIS) ein 100 x 100-Raster gewählt. Somit wurden nach dem modellbedingten Diskretisierungsabstand von 50 x 50 m eine nochmalige Interpolation mit einer Schrittweite von 100 x 100 m mittels des Kriging-Verfahrens durchgeführt.

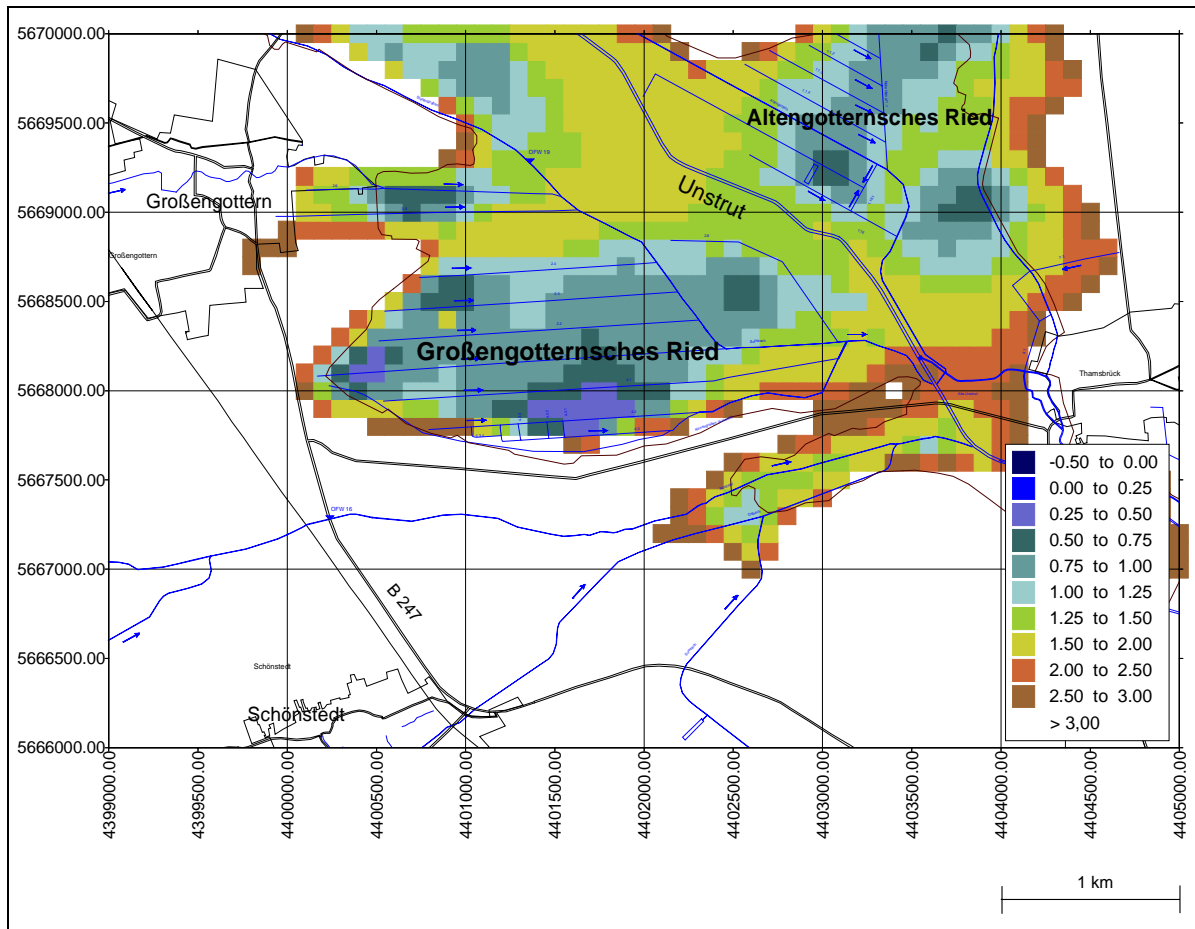
Das Ergebnis der Interpolation ist als Druckspiegelhöhen (in m u. GOK) in den Anlagen I/4.2-2 (August 1998) und I/4.2-3 (März 1999) dargestellt. Die Genauigkeit der Darstellung ist jedoch immer an die Dichte der Meßstellen (durch Interpolationseffekte) und an die Genauigkeit des digitalen Höhenmodells gebunden.

Die Grundwasserflurabstände im Unstruttal auf dem Abschnitt Bollstedt - Altengottern zeigen als Ergebnis der Verschneidung von interpolierten Grundwasserständen und digitalem Höhenmodell in beiden Meßzuständen, daß der Unstrut-Verlauf sich nicht mit den geringsten Flurabständen deckt. Dies ist ein Ergebnis des aus dem Geländetiefsten herausverlegten Verlaufes des Unstrutbettes.

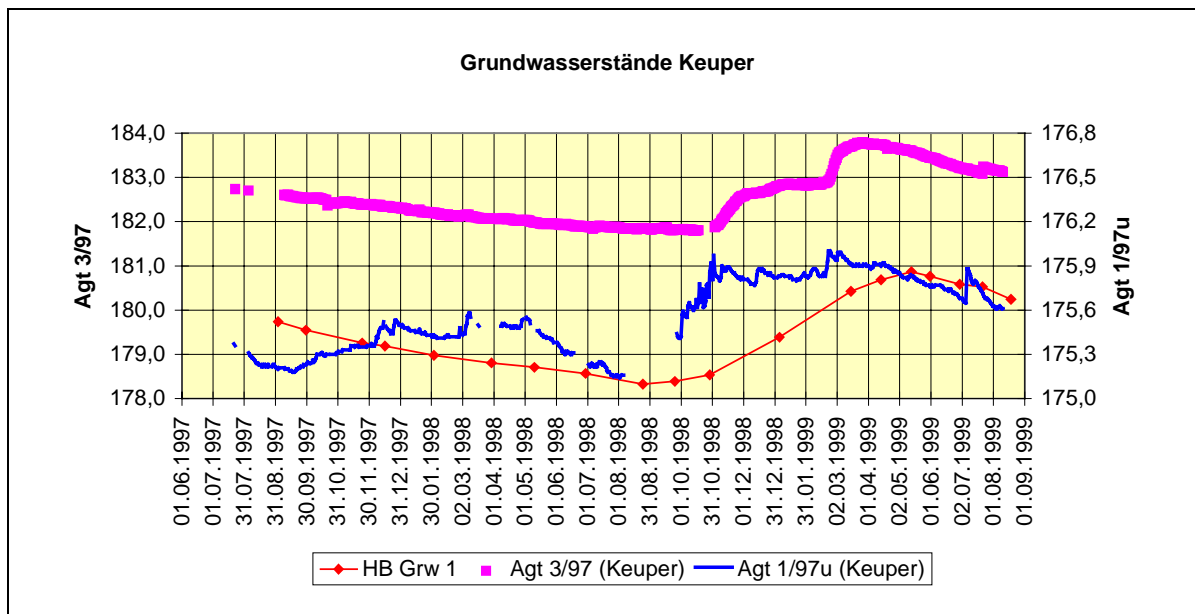
Im Großengotternschen Ried haben sich auf Grund der Interpolation in beiden Meßzuständen geringere Flurabstände ergeben als sie im Altengotternschen Ried gemessen wurden. Da im Großengotternschen Ried jedoch keine Meßstellen vorhanden waren, wurden nachträglich die Flachpegel 6 - 9 gesetzt (s. Tab. 3.2-2), um hier die Flurabstände erfassen zu können. Die Abbildung 4.2-1 zeigt die differenzierten Verhältnisse im Großengotternschen Ried.

Um die Strömungsverhältnisse in das Altengotternsche und das Großengotternsche Ried in ihrer Dynamik beschreiben zu können, wurden die **Ganglinien** der gemessenen Grundwasserstände gegeneinander verglichen. Dies geschah zunächst visuell und wurde danach zwischen ausgewählten Pegeln mittels Korrelation der Grundwasserstände vorgenommen. Es handelt sich dabei um eine "örtliche" Korrelation.

Der Vergleich der Loggeraufzeichnungen zwischen den Keupermeßstellen in der Aue (Agt 1/97 und Agt 2/97) mit der Meßstelle Agt 3/97 ließen zunächst erkennen, daß die Charakteristiken der Ganglinien sich unterscheiden (s. Abb. 4.2-2). Während in den Auenmeßstellen eine jährliche Amplitude zu verzeichnen ist, zeigt die Meßstelle 3/97 einen ausgeprägten überjährlichen Gang. Damit war der erste Hinweis gegeben, daß diese Meßstelle einem anderen oder gegenüber dem Südwestteil des Gebietes stark gedämpften Dynamik-Regime unterliegt. Diesem ist offensichtlich auch der Brunnen am Bahnhof Großwelsbach (HB Grw 1) zuzuordnen, der die gleiche Gangliniencharakteristik zeigt wie die Meßstelle Agt 3/97.



**Abb. 4.2-1: Flurabstände der Grundwasserdruckfläche im Großengotterschen Ried (Mai 99)**



**Abb. 4.2-2: Ganglinien der Keupermeßstellen im Nordosten des Untersuchungsgebietes**

Die Korrelationsmatrix der Meßwerte ist in Tabelle 4.2-1 wiedergegeben.

Tabelle 4.2-1: Korrelationskoeffizienten zwischen Meßstelle Agt 3/97 und weiterer Keuper-Meßstellen

	Agt 3/97 (Keuper)	Agt 1/97u (Keuper)	Agt 2/97 (Keuper)	HB Grw 1
Agt 3/97 (Keuper)	1,000			
Agt 1/97u (Keuper)	0,703	1,000		
Agt 2/97 (Keuper)	0,883	0,796	1,000	
HB Grw 1	0,964	0,583	0,899	1,000

An dieser Tabelle wird der Zusammenhang zwischen Meßstelle Agt 3/97 und Brunnen Großwelsbach deutlich, wodurch von einem einheitlichen Dynamik-Regime im Norden und Osten des Untersuchungsgebietes auszugehen ist. Nach HANNAPPEL u.a. (1999) kann grundsätzlich ein hydraulischer Zusammenhang erst bei Korrelationskoeffizienten von  $\rho > 0,9$  festgestellt werden. Diese Aussage ist jedoch für den Lockergesteinsbereich getroffen worden. Um die hydraulischen Verhältnisse im Festgesteinbereich zu ermitteln, werden hier die Korrelationskoeffizienten nur miteinander verglichen.

Der Vergleich der Ganglinien der Meßstellen Agt 1/97 und Agt 2/97 mit denen der Meßstellen im Südwesten der Unstrutau (Abb. 4.2-3) zeigten engere Zusammenhänge, wengleich die Messungen im Gesamteinzugsgebiet nur etwa monatsweise durchgeführt wurden.

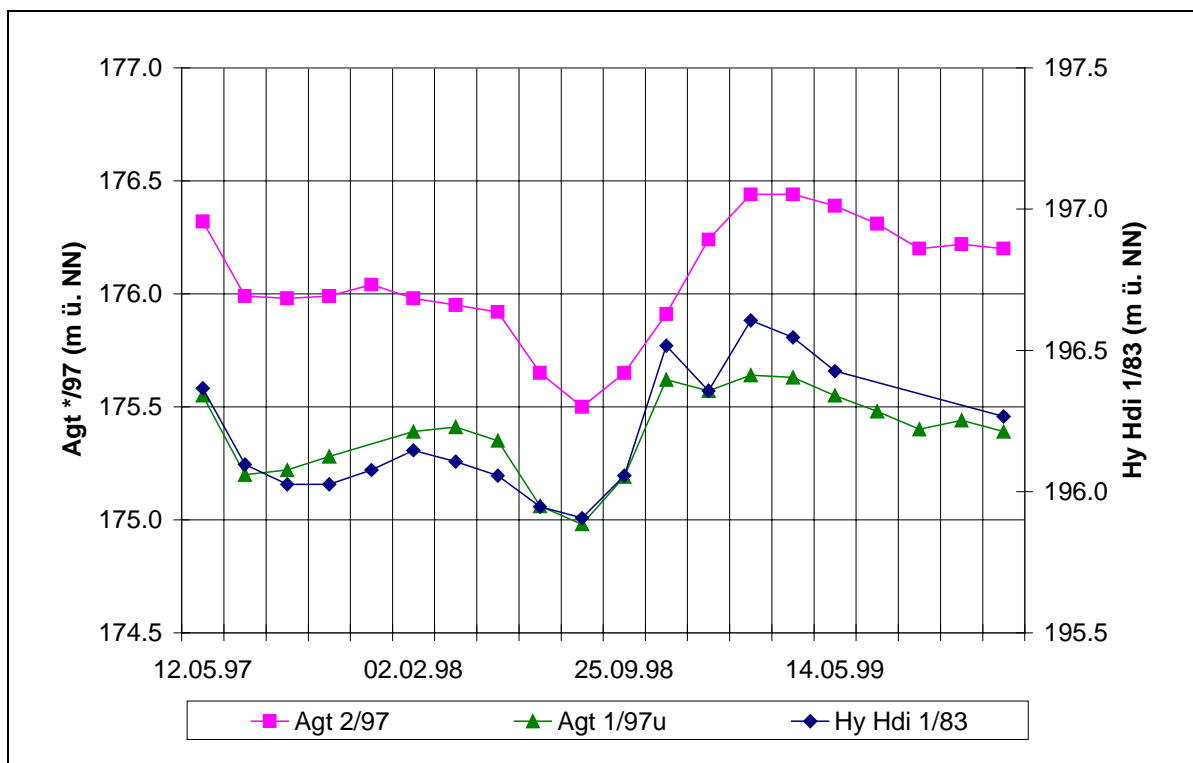


Abb. 4.2-3: Ganglinienvergleich Keuper - rechts und links der Unstrut

An dieser Abbildung kann demonstriert werden, daß die Dynamik der Keuper-Wasserstände im Liegenden der Aue zwischen Altengottern und Großengottern von den Zuflüssen im Südwesten bestimmt werden. Weitere Korrelationen zwischen den KeuperMeßstellen in der Aue einerseits zur Meßstelle südwestlich der Unstrut und andererseits im Norden und Osten des Untersuchungsgebietes untertützen diese Aussage (s. Tab. 4.2-2).

Tabelle 4.2-2: Korrelationskoeffizienten zwischen Keuper-Meßstellen unterschiedlicher Strömungsregime

Lage:	Hy Grgt 1/73	Agt 1/97u	Agt 2/97	F Ag 3/97	HB Grw 1
	Ortslage Großengottern (ehem. Kaufhalle)	Altengott. Ried	nördlich Altengott. Ried	Nordrand UG	Nordostrand UG
Hy Grgt 1/73	1,00				
Agt 1/97u	0,90	1,00			
Agt 2/97	0,74	0,84	1,00		
Agt 3/97	0,63	0,67	0,94	1,00	
HB Grw 1	0,55	0,58	0,90	0,96	1,00

Der Zufluß aus Südwesten (Speisungsgebiet) in die Unstrutau ist jedoch auch differenziert zu betrachten, wie die Auswertung der Messungen zwischen Höngeda und Schönstedt zeigen (Tabelle 4.2-3).

Tabelle 4.2-3: Korrelationsmatrix der Meßstellen zwischen Höngeda und Großengottern

Lage:	Hy Hdi 1/83	HB Ho.G 1	Hy Ho.G 2/75	Hy Ho.G 1/85	Hy Grgt 1/73
	oh. Ortslage Heroldishausen	Ortslage Höngeda	Ortslage Höngeda, Ortsausgang Ri. Mühlhausen	Ortslage Höngeda (Kindergarten)	Ortslage Großengottern (ehem. Kaufhalle)
Hy Hdi 1/83	1,000				
HB Ho.G 1	0,985	1,000			
Hy Ho.G 2/75	0,918	0,917	1,000		
Hy Ho.G 1/85	0,961	0,940	0,979	1,000	
Hy Grgt 1/73	0,915	0,951	0,876	0,873	1,000

Südlich von Großengottern werden die Zuflußbedingungen in das Unstruttal differenzierter, was sich anhand des Ganglinienvergleiches mit den Meßstellen um Schönstedt zeigt (s. Abb. 4.2-4 und Tabelle 4.2-4).

Tabelle 4.2-4: Korrelationsmatrix der Meßstellen im südwestlichen Untersuchungsgebiet

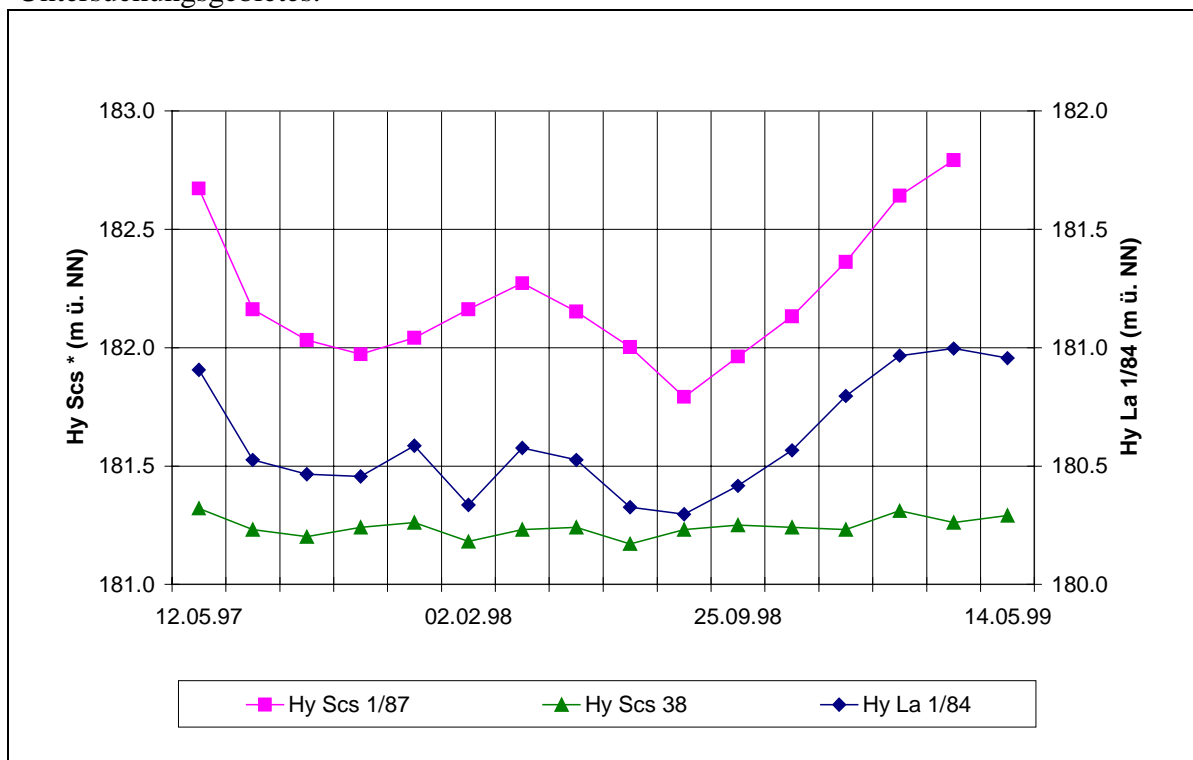
	Hy Grgt 1/73	Hy Hdi 1/83	Hy Scs 1/87	Hy Scs 38	Hy La 1/84	Hy La 2/84
--	--------------	-------------	-------------	-----------	------------	------------



Lage:	Ortslage Großengottern (ehem. Kaufhalle)	oh. Ortslage Heroldishausen	nördlich Ortslage Schönstedt (Gartensparte)	östlich Ortslage Schönstedt (Gärtnerei Ackermann)	Deponie Kalkberg (an der B 247)	Deponie Kalkberg
Hy Grgt 1/73	1,000					
Hy Hdi 1/83	0,915	1,000				
Hy Scs 1/87	0,802	0,831	1,000			
Hy Scs 38	0,633	0,624	0,613	1,000		
Hy La 1/84	0,838	0,858	0,934	0,784	1,000	
Hy La 2/84	0,739	0,813	0,935	0,725	0,964	1,000

Besonders auffällig ist hierbei die Meßstelle Hy Scs 38 (Gärtnerei Ackermann). Diese Meßstelle zeigt insgesamt eine geringe Dynamik und ist wahrscheinlich vom nur ca. 100 m nördlich verlaufenden Orlbach beeinflusst, was darauf hinweist, daß es zwischen dem Keuper und den rechtsseitigen Nebenflüssen der Unstrut eine gute Kommunikation gibt. Dieser Sachverhalt wurde der Interpretation der Einzugsgebietsmodellierung am Nordmar zugrundegelegt.

In Abb. 4.2-4 zeigen sich die differenzierten dynamischen Verhältnisse im Süden des Untersuchungsgebietes.



**Abb. 4.2-4: Ganglinien des südwestlichen Untersuchungsgebietes**

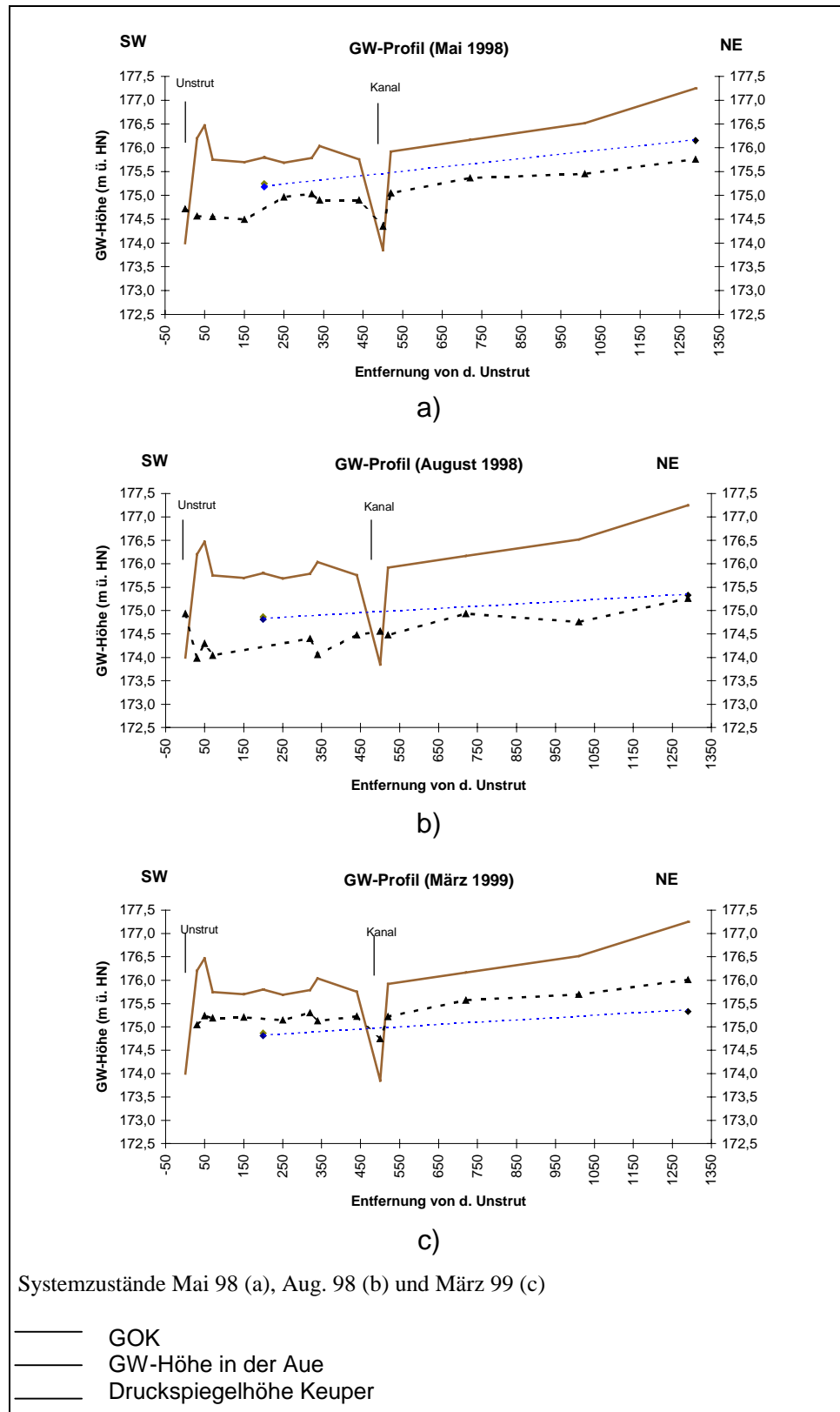
Mit diesen Ganglinienvergleichen konnten die hydraulischen Verhältnisse des unteren Gipskeupers für das hydrogeologische Strukturmodell hinreichend genau erklärt werden. Es war davon auszugehen, daß der Hauptzustrom, mit einer engen hydraulischen Ankopplung des Keuper-Grundwassers im Liegenden der Aue an das Speisungsgebiet aus

dem Westen und Nordwesten erfolgt. Im Süden des Untersuchungsgebietes machen sich die lokalen Vorfluter Sumbach, Orlbach und Nordmar stärker bemerkbar.

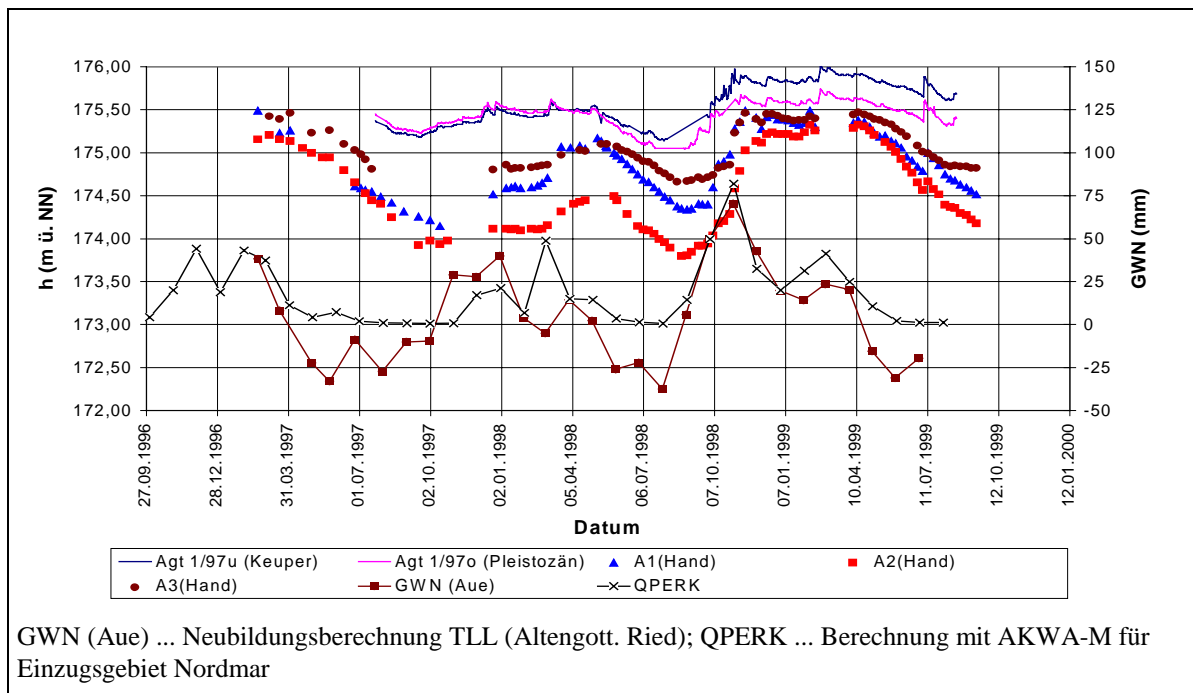
Danach kam es darauf an, die hydraulischen Verhältnisse zwischen Keuper und Quartär zu klären. Dazu ist in Abb. 4.2-5 der gemessene Verlauf der Grundwasseroberfläche in den Auensedimenten entlang eines Profils im Altengotternschen Ried zu drei Systemzuständen aufgetragen. Die Druckspiegellinie des Grundwassers im Gipskeuper (Ag 1/97u: Filteroberkante bei 156,8 m ü. NN; Agt 2/97 Filteroberkante bei 160,2 m ü. NN) verdeutlicht dabei die Druckverhältnisse und belegt den vertikal aufwärts gerichteten Grundwasserstrom in den Auensedimenten. Entwässernd wirken hier Kanäle und Gräben, wie sich anhand des Kanalwasserstandes des Altengotternschen Kanals zeigt. Diese Verhältnisse haben sich nur im März 1999 umgekehrt, hier lagen die Grundwasserstände in den Riedsedimenten über dem Druckspiegelniveau des Keupers. Eine Begründung dafür ist die starke winterliche Grundwasserneubildung, die sich sowohl über den Druck aus dem Speisungsgebiet als auch in der Aue selbst bemerkbar macht.

Anmerkung:

Diese Betrachtungen konnten auf Grund der Meßstellenanordnung (Flachpegel, die erst im Jahr 1998 installiert wurden) im Großengotternschen Ried nicht gemacht werden. Es zeigte sich erst anhand der Modellierungsergebnisse von BCE (1998), daß auf Grund des Unstrutverlaufes das Großengotternsche Ried nach Umverlegung der Unstrut eine größere Bedeutung erlangt als das Altengotternsche Ried. In Kap. 2 wird die Auswahl der Unstersuchungsflächen und Meßstellenstandorte ausführlich begründet.



**Abb. 4.2-5: Profile der Grundwasserhöhe im Altengotternschen Ried**

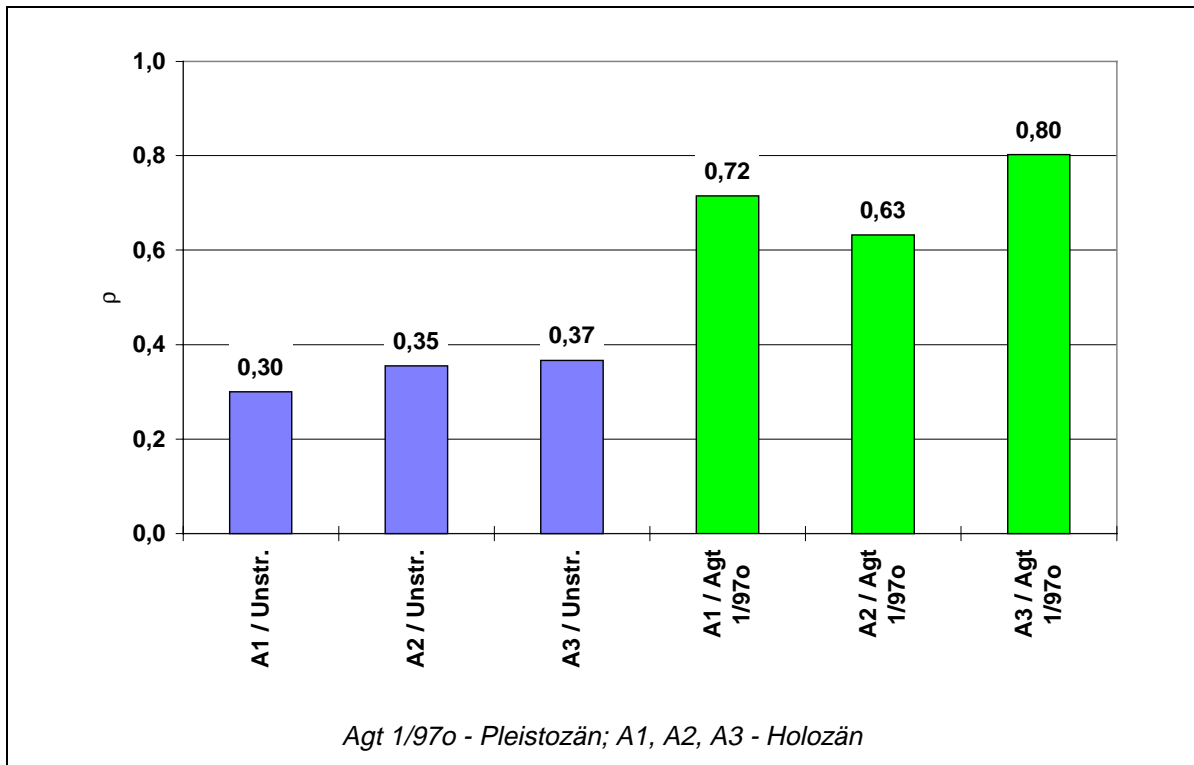


**Abb. 4.2-6: Grundwasserstandsganglinien in der Aue und Grundwasserneubildung**

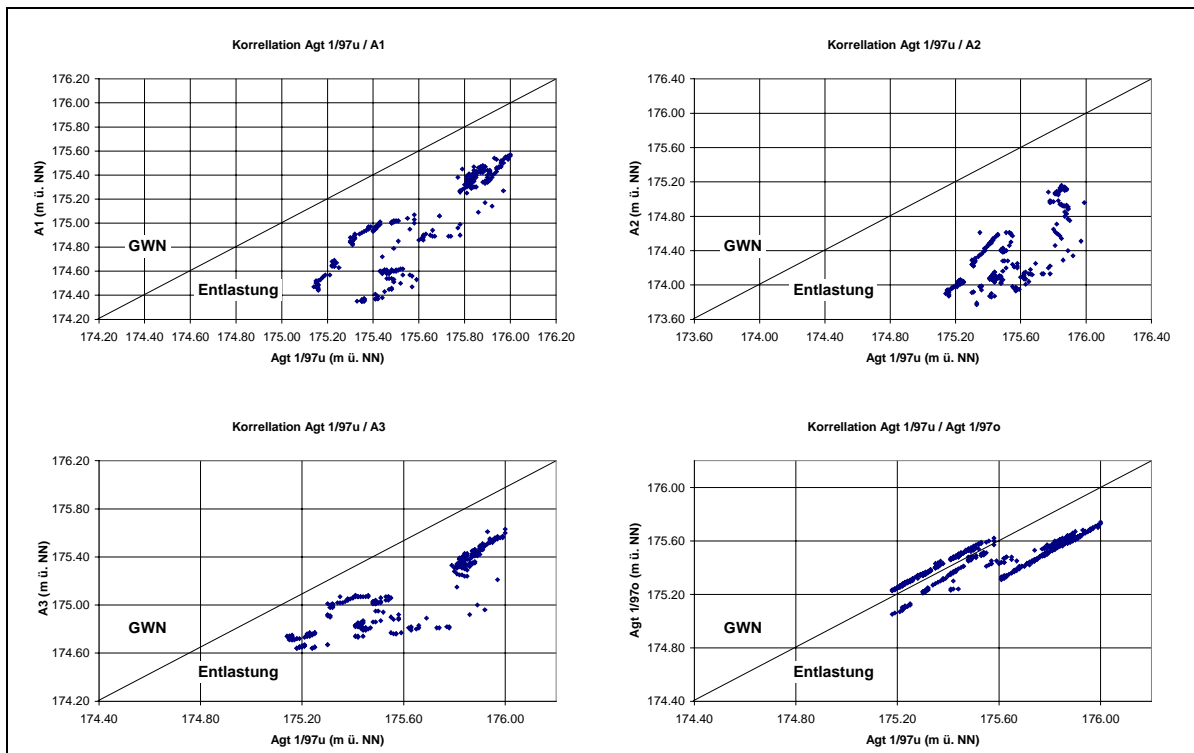
Die Ganglinien der Grundwasserstände in den Pegeln Ag 1u (Filteroberkante bei 156,8 m ü. NN) und Ag 1o (Filteroberkante bei 170,9 m ü. NN) zeigen ein analoges Ergebnis (s. Abb. 4.2-6). In der Meßstelle des Quartär bilden sich die analogen Wasserstände zu den Wasserständen im Keuper aus. Somit sind auch die Prozesse der Beschaffenheitsänderungen im Grundwasser der Aue vor dem Hintergrund zu sehen, daß die maßgeblichen Druckverhältnisse, die zu den Wasserständen in der Aue führen, von den Druckverhältnissen im Keuper bestimmt werden.

Die Grundwasserneubildungsganglinien des Speisungsgebietes und der Aue zeigen, daß die Grundwasserstände in der Aue nicht unmittelbar nur von der Grundwasserneubildung in der Aue abhängen.

Um den Einfluß der Unstrut auf die Grundwasserstände in der Aue abbilden zu können, wurden die Ganglinien der Grundwassermeßstellen A1, A2 und A3 (Holozän, Meßstellen an den Lysimetern) mit der Ganglinie der Meßstellen Agt1/97o (Pleistozän) und den gemessenen Unstrut-Wasserständen korreliert (s. Abb. 4.2-7). Die Ergebnisse zeigen, daß im Bereich des Altengotternschen Rieds die Grundwasserstandsänderungen keine Korrelation zu den Unstrut-Wasserständen aufweisen, jedoch mit der Dynamik des aus dem Liegenden zuströmenden Grundwassers schwach korrelieren.



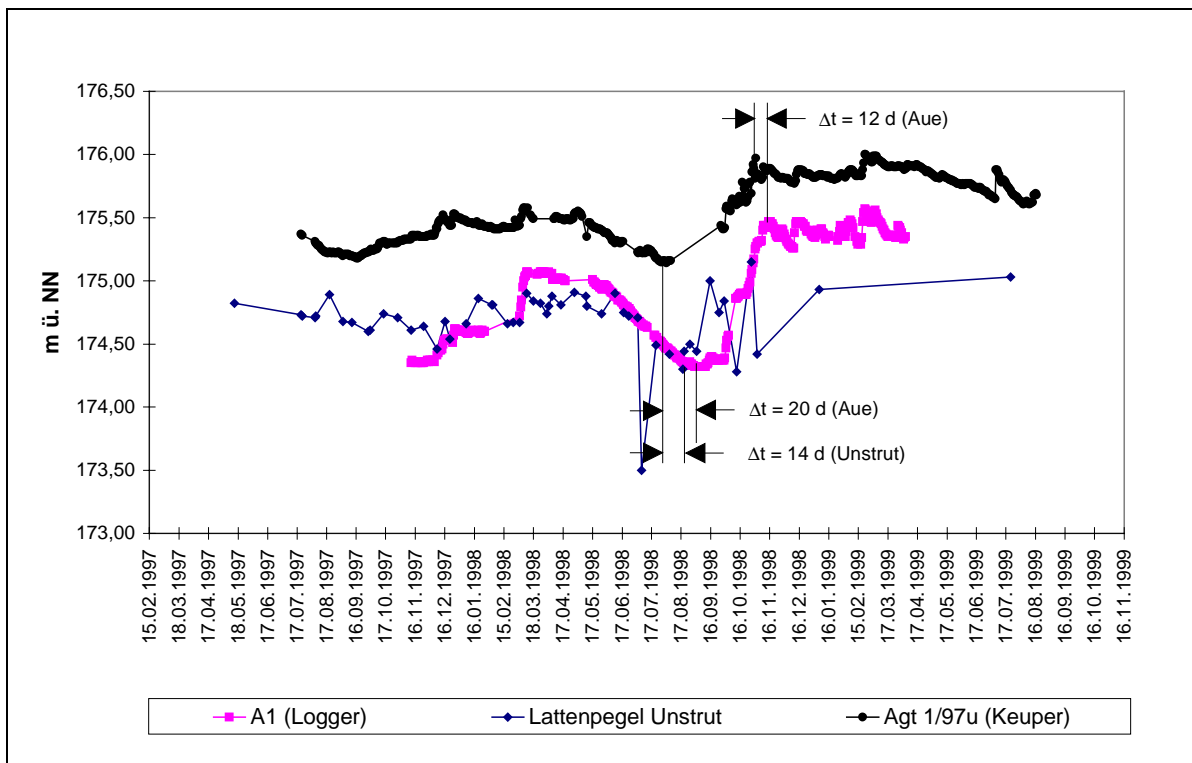
**Abb. 4.2-7: Korrelationskoeffizienten der Grundwasserstandsganglinien zur Unstrut**



**Abb. 4.2-8: Ganglinienkorrelation im Altengotterschen Ried**

Nachdem auf Grund der "örtlichen Korrelationen" die lokalen dynamischen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet ermittelt werden konnten, wurde versucht, auch eine "zeitliche Korrelation" vorzunehmen. Diese sollte das Ziel haben, die Druckverhältnisse und Abhängigkeiten der Grundwasserstände in der Aue aufzuklären. Dazu wurden die Ganglinien der Lysimeter-Meßstellen an A 1, A 2, A 3 und Agt 1/97o mit den Ganglinien der Meßstelle Agt 1/97u gegeneinander korreliert (s. Abb. 4.2-8).

Vor allem die unteren Abschnitte der Kurven zeigen ein hystereres Verhalten zwischen ansteigenden und abnehmenden Wasserständen im Keuper und Quartär. Das Nachziehen der Quartärwasserstände gegenüber den Keuperwasserständen ist der Beleg dafür, daß die Wasserstände in der Aue von dem Wasserdruck aus dem Keuper beeinflußt werden. In Abbildung 4.2-9 kann anhand des Wasserstandsminimums im August 1998 eine zeitliche Phasenverschiebung von  $\Delta t = 20$  d zwischen Keuperwasserstand und Wasserstand in der Aue ermittelt werden. Zwischen Keuperganglinie und den Wasserständen der Unstrut zeigt sich ebenfalls eine zeitliche Phasenverschiebung, sie beträgt zu dem oben beschriebenen Zeitpunkt  $\Delta t = 14$  d. In Analogie zu den Verhältnissen in der Aue ist damit belegt, wie auch die Unstrut als entlastendes Element in ihrem jährlich Gang den Wasserspiegeln des Keuper folgt.

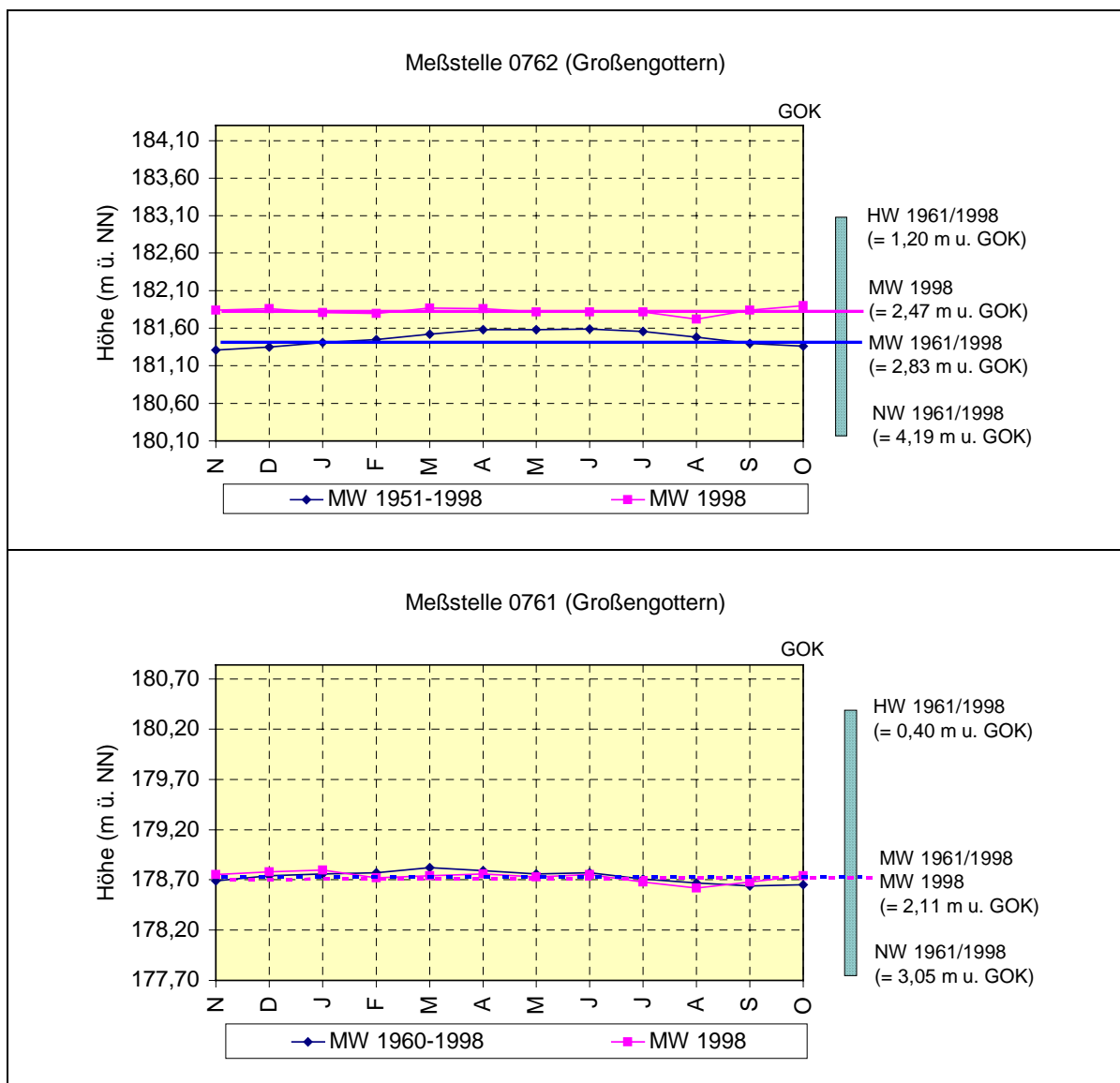


**Abb. 4.2-9: Ganglinienvergleich Unstrut, Keuper und Aue**

Das Nachführen der Wasserstände in der Aue beim Wiederanstieg vollzieht sich erwartungsgemäß schneller. So wird in der Aue das Maximum der Wasserstände nur 12 Tage später als im Keuper erreicht. Der Unstrutwasserspiegel ist zu diesem Zeitpunkt offensichtlich durch antropogene Einflüsse (Wehr Thamsbrück gezogen?) verfälscht.

Für die ökologische Fragestellungen des Projektes (Grundwasserflurabstände in der Aue) ist auch die Einordnung des Untersuchungszeitraumes in das langjährige Geschehen einzuordnen. Dazu standen im Untersuchungsgebiet die Staatlichen Meßstellen 0750 und 0751 (zwischen dem Welsbach und der Ortslage Thamsbrück) und die Meßstellen 0760 (Ortslage Altengottern), 0761 (Straße zwischen Altengottern und Großengottern) und 0762 (Ortslage Großengottern) zur Verfügung.

An Abbildung 4.2-10 sind die Monatsmittelwerte des Untersuchungsjahres 1998 den langjährigen Monatsmittelwerten der Staatlichen Meßstellen gegenübergestellt.



**Abb. 4.2-10: Vergleich der langjährigen Monatsmittel mit den Monatsmittelwerten Staatlicher Grundwassermeßstellen im Speisungs- und Enlastungsgebiet**

(Fortsetzung der Abbildung nächste Seite)

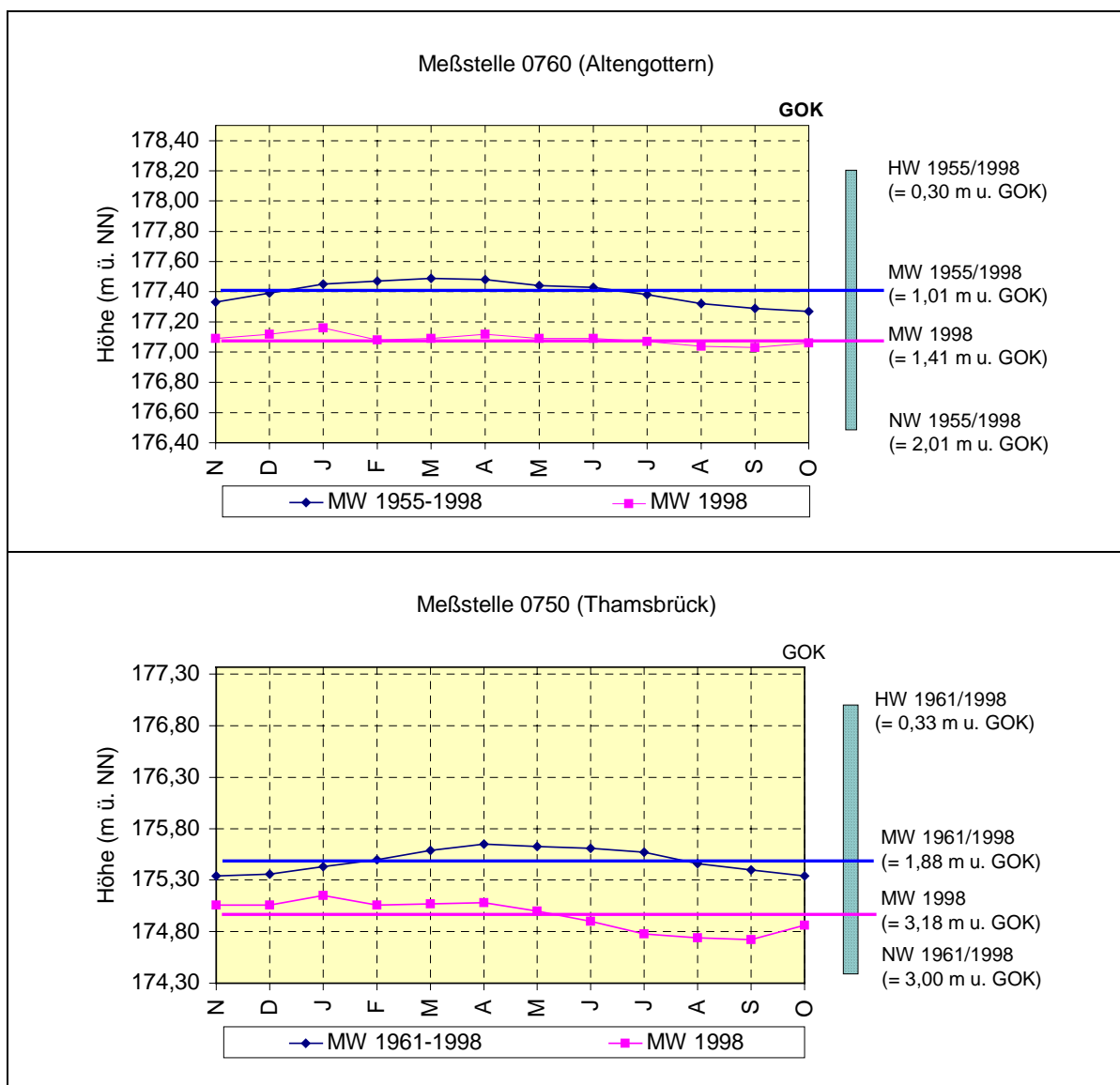


Abb. 4.2-10: Vergleich der langjährigen Monatsmittel mit den Monatsmittelwerten Staatlicher Grundwassermeßstellen im Speisungs- und Entlastungsgebiet (Fortsetzung)

Daraus lassen sich folgende Schlüsse ableiten, die vor allem für die Interpretation der Modellierungsergebnisse, die an dem Mittelzustand 1998 geicht wurden, von Bedeutung sind.

Die Wasserstände im Speisungsgebiet (0762 - Großengottern) waren im Untersuchungs-jahr 1998 um ca. 40 cm höher als im langjährigen Mittel. Im Übergangsgebiet zwischen Speisungs- und Entlastungsgebiet (0761 - Großengottern-Altengottern) waren die Monatsmittelwerte des Jahres 1998 denen des langjährigen Mittels gleich. Im Auenbereich waren die Monatswerte der Grundwasserhöhen im Jahr 1998 generell niedriger als im langjährigen Mittel, wobei die Unterschiede erheblich sind. So lagen die Werte in Altengottern um ca. 40 cm unter dem langjährigen Mittel, bei Thamsbrück lagen die Werte sogar ca. 1,30 m unter dem langjährigen Mittelwert.



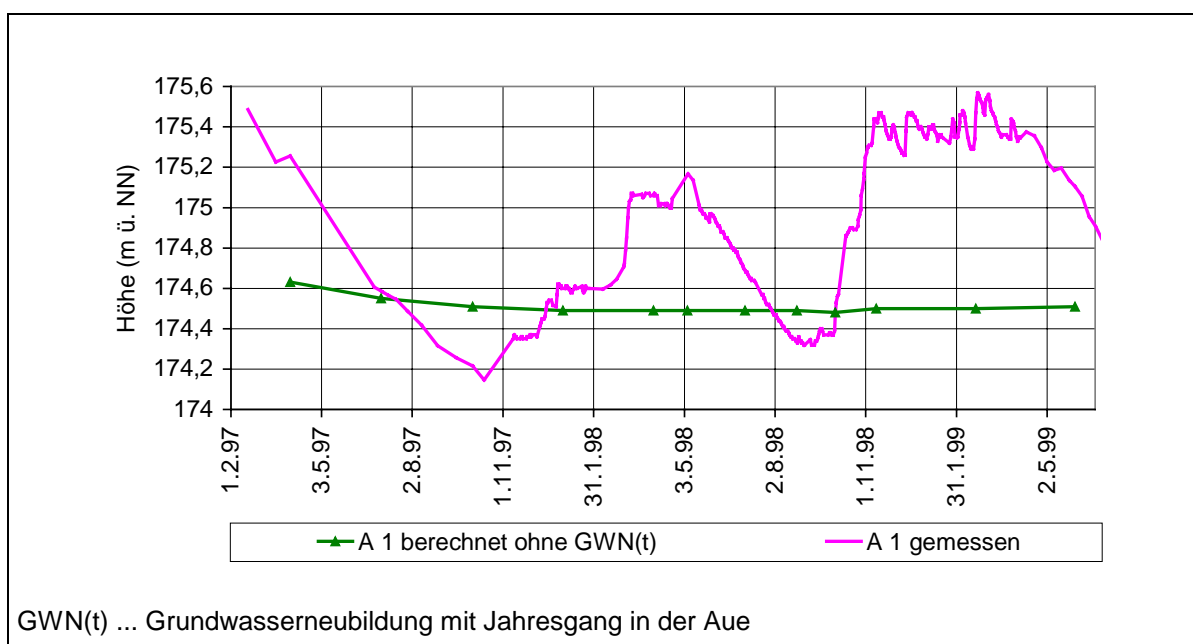
Für die Ergebnisse der Modellierung der Grundwasserstände in der Aue bedeutet dies, daß die auf den aktuell gemessenen Wasserständen beruhenden, angenommenen Szenarien (es wurde der Wasserstand von Mai 1998 zugrundegelegt) um mindestens 40 cm größere Flurabstände aufweisen, als sie im langjährigen Mittel zu erwarten sind. Die langjährigen Mittelwerte geben allerdings keine Aussage über Häufigkeit und Dauer hoher und niedriger Wasserstände. Dazu sind entsprechende statistische Auswertungen durchzuführen.

## 4.2.2 Modellierungsergebnisse und Prognose der Entwicklungsalternativen

### 4.2.2.1 Modellierungsergebnisse zur Grundwasserdynamik des Ist-Zustandes

Bezüglich des Ist-Zustandes wurden mittels der Modellierung vor allem die instationären Verhältnisse des Systems nachgebildet. Wie die Analyse der Grundwasserdynamik zeigte, wird eine starke Abhängigkeit der Dynamik der Grundwasserstände in der Aue von dem Jahresgang der Grundwasserneubildung sowohl im Speisungsgebiet als auch im Entlastungsgebiet gesehen. Weiterhin wurde abgeleitet, daß der jährliche Unstrutgang eine untergeordnete Wirkung auf die Auen-Grundwasserstände ausübt.

Mittels der instationären Berechnungen am Ist-Zustand wurde deshalb versucht, die Sensitivität von Grundwasserneubildung und Unstrut zu ermitteln. Dazu wurden, nachdem das Modell anhand der Pegelganglinien HyHdi 1/83 (Speisungsgebiet) und A 1 (Unstrut-Aue) instationär geeicht wurde (s. Kap. 3.4.7.2), die Modellganglinie der Grundwasserneubildung im Speisungsgebiet als variable Randbedingung angesetzt. In der Unstrut- und Saale-Aue wurde die mittels GEOFEM berechnete langjährige Grundwasserneubildung als konstante Randbedingung angenommen. Der Randbedingung Unstrut wurde der im Projektzeitraum gemessene Jahresgang aufgeprägt. Das Ergebnis ist in Abb. 4.2-11 dargestellt.

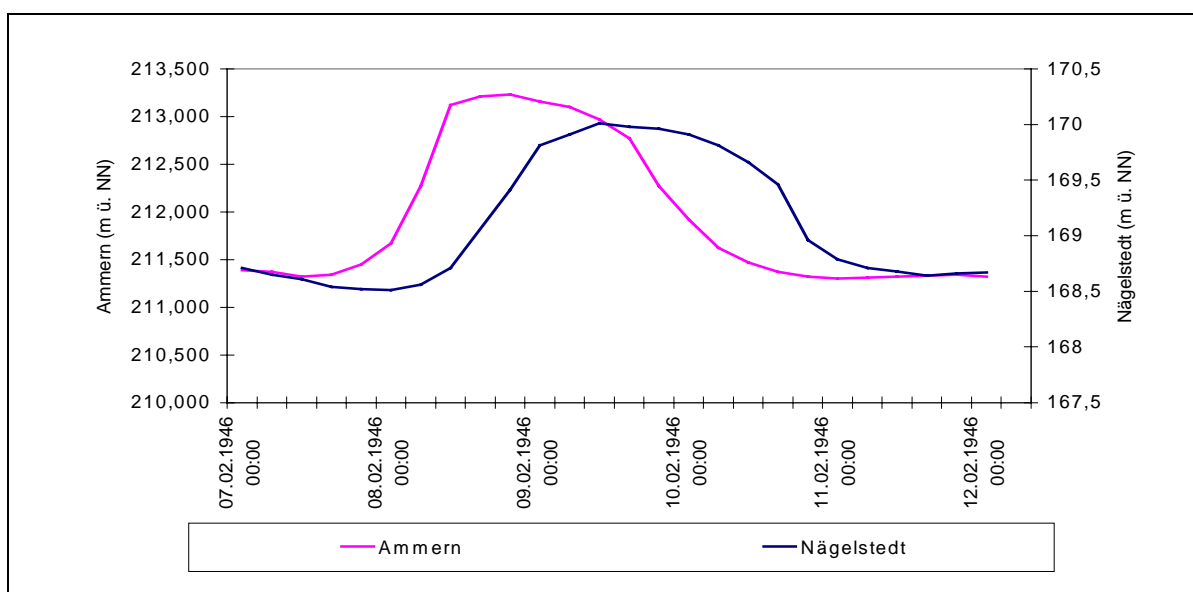


### Abb. 4.2-11: Ergebnis der instationären Berechnung des Ist-Zustandes

Das Modellierungsergebnis weist somit eine starke Abhängigkeit der Grundwasserstände in der Aue von der Grundwasserneubildung in der Aue aus. Die Druckübertragung von den Speisungsgebieten in die Entlastungsgebiete wird mit dem Modell hingegen unzureichend abgebildet.

In einer weiteren Berechnung wurde für den Ist-Zustand die Wirkung eines angenommenen 100-jährigen Hochwassers der Unstrut innerhalb der Deiche berechnet. Die Hochwasserwelle wurde in Analogie zu einem realen Hochwasserereignis im Jahre 1946<sup>1)</sup> angesetzt

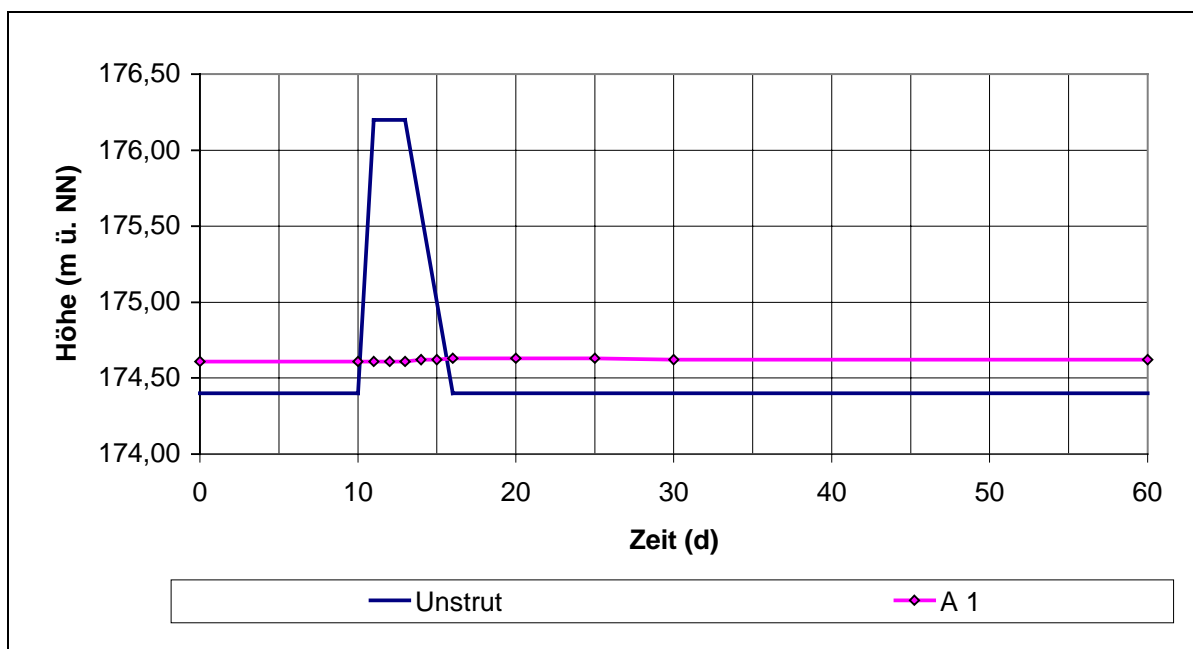
(s. Abb. 4.2-12). Das Ergebnis der Berechnung zeigt die Abbildung 4.2-13.



### Abb. 4.2-12: Verlauf des Unstrut-Hochwassers Februar 1946

Es zeigt sich, daß aufgrund der Eindeichung der Unstrut und des bindigen Sedimentes in der Aue, es bei einem derartig kurzen Hochwasserereignis, wie es das Februar-Hochwasser im Jahr 1946 darstellte, zu einer Anhebung der Grundwasserstände an der Meßstelle A 1 um 2 cm kommt. Daraus wird deutlich, daß unter den derzeitigen wasserbaulichen Bedingungen auch ein Hochwasser der Stärke eines  $HQ_{100}$  zu keinen signifikanten Anhebungen des Grundwassersstandes in der Aue führt.

<sup>1)</sup> Von den Berechnungen der BCE (1998) vom November 1940 (s. Abschlußbericht TP 7, Abschn. 8.2) lagen nur Mengen-Kurven, keine Höhen-Kurven vor. Deshalb wurde das Hochwasser Februar 1946 zugrundegelegt.



**Abb. 4.2-13: Wirkung eines Hochwasser HQ<sub>100</sub> auf die Grundwasserstände in der Aue im Ist-Zustand**

#### 4.2.2.2 Modellierungsergebnisse zur Entwicklungsalternative 2

Das Ergebnis der Modellrechnung für die Entwicklungsalternative 2 ist in Anl. I/5-1 als Karte der berechneten Druckspiegelhöhen (in m unter GOK) dargestellt. Diese Druckspiegelhöhen entsprechen den Grundwasserflurabständen des Ist-Zustandes im Untersuchungsgebiet in Mittelwassersituation, sind jedoch unter den Bedingungen aufsteigenden Grundwassers unter bindigen Deckschichten mit den Grundwasserflurabständen zahlenmäßig nicht gleichzusetzen. In Abb. 4.2-14 ist der Unterschied zwischen gemessenen Grundwasserflurabständen und berechneten Druckspiegelhöhen dargestellt.

Die Abb. 4.2-15 zeigt die berechneten Druckspiegelhöhen der EA 2 (entspricht ANP 1). Daß die berechneten Wasserstände im südlichen Teil des Altengotternschen Rieds niedriger liegen als die Mittelwerte der gemessenen Grundwasserflurabstände, ist ein Effekt der Eichung des Modells. Dies wurde unter Verwendung des gemessenen Zustandes vom Mai 1998 geeicht. Vor allem die Meßwerte ab Oktober 1998 haben aber zu einer ständigen Anhebung des Mittelwertes der gemessenen Werte geführt (s. a. Kap. 3.4.7.1).



### 4.2.2.3 Modellierungsergebnisse zur Entwicklungsalternative 3

Die Modellierung der Entwicklungsalternative 3 erfolgte mit analogen Randbedingungen zu den Berechnungen der Entwicklungsalternativen 1 und 2 (Ist-Zustand und ANP 1).

Aus den Rechnungen ergeben sich nördlich des Altengotternschen Kanals mittlere Druckspiegelhöhen mit Flurabständen zwischen 0,75 und 1,0 m. Legt man auf diese mittleren Werte allein die im Untersuchungsraum gemessene Schwankungsbreite der Grundwasserflurabstände, so zeigt sich, daß in den nördlichen Bereichen des Altengotternschen Rieds die prognostizierten Wasserstände bei Einstau des "Nebenkanals 1.1" über den im Meßzeitraum maximal gemessenen Grundwasserständen liegen werden.

Zusammenfassend lassen sich für das Untersuchungsgebiet Bollstedt bis Thamsbrück die Entwicklungsalternativen 2 und 3 von den Verhältnissen der Grundwasserhydraulik hier wie folgt bewerten:

- Die Grundwasserdynamik in der Aue hängt auf Grund der bindigen Auensedimente von den Druckverhältnissen des aus dem Liegenden aufsteigenden Grundwassers ab.
- Im Hinblick auf die Einwirkung der Unstrut-Dynamik auf die Grundwasserstände in der Aue sind die Entwicklungsalternativen 2 und 3 durch den kanalisiert und damit "starrten" Verlauf der Unstrut nicht relevant.
- Nur durch Rückbau von meliorativen Elementen in der Aue kann die Dynamik der Grundwasserflurabstände zu gewünschten Vernässungseffekten und damit zu einem für Vernässungsstandorte optimalen Bodenfeuchteregime führen. Maßnahmen wie der Anstau des "Nebenkanals 1.1" können dafür zielführend sein.

### 4.2.2.4 Modellierungsergebnisse zur Entwicklungsalternative 4

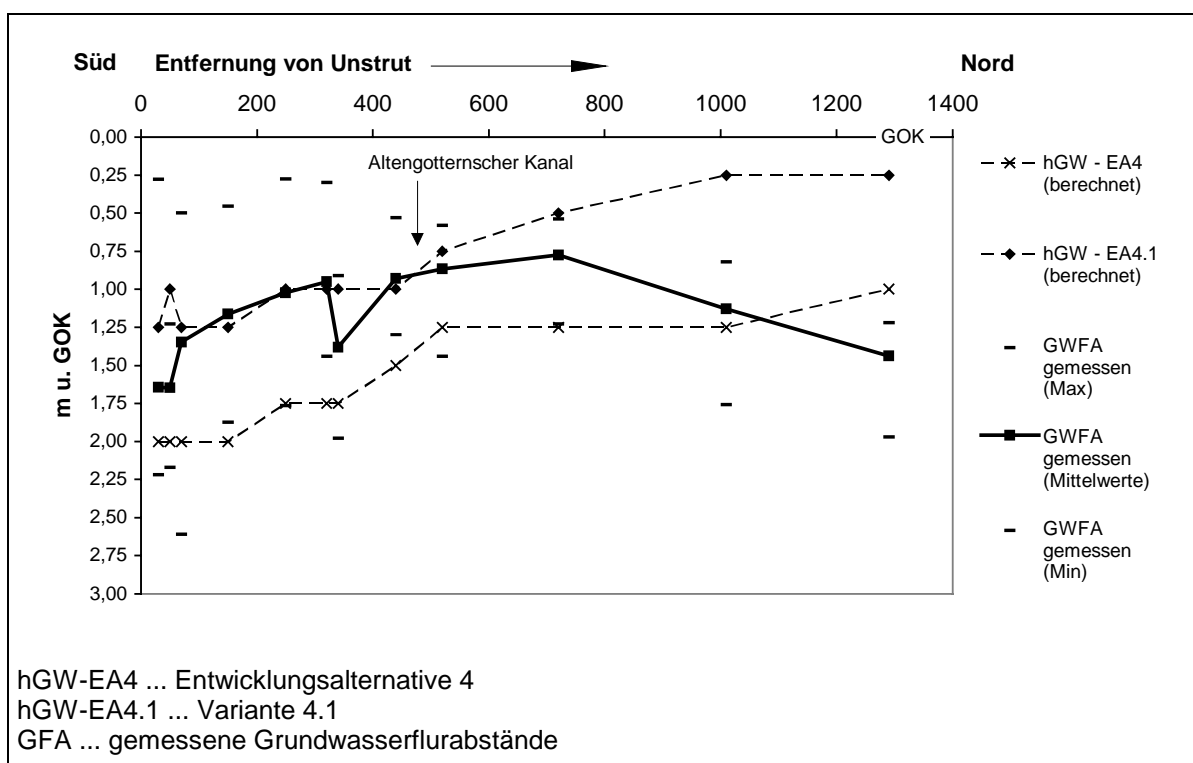
Die in Tab. 3.4-2. genannten Randbedingungen haben, wie die Modellierungsergebnisse zeigen, vor allem auf die Grundwasserflurabstände im Großengotternschen Ried einen erheblichen Einfluß. So wird es hier durch den Wegfall der Gräben südöstlich der Ortslage Großengottern zu einer Anhebung der Grundwasserstände kommen. Der in Anlage I/5-4a beigegebene Differenzenplan weist Differenzen der Flurabstände zwischen 0,00 und 1,40 m gegenüber dem modellierten Ausgangszustand aus.

Im Bereich des Altengotternschen Rieds stellen sich hingegen andere Verhältnisse ein. Hier wurden mittlere Druckspiegelhöhen zwischen 2,2 und 1,0 m u GOK errechnet (s. Anlage I/5-4), was teilweise sogar ein Absinken des Grundwasserstandes gegenüber den gemessenen Werten darstellt. Die Ursache hierfür ist in zwei Sachverhalten zu sehen:

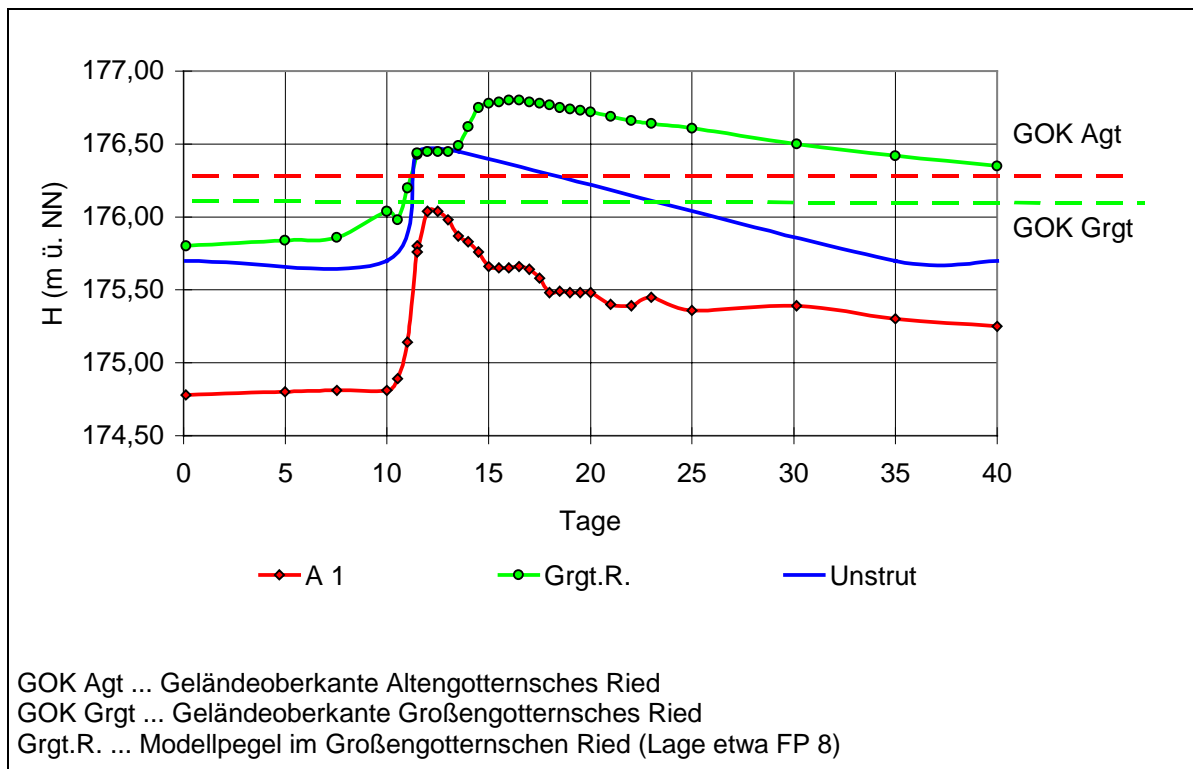
- Der Altengotternsche Kanal sowie der "Nebenkanal 1.1" wird in dieser Entwicklungsalternative als entwässerndes Element beibehalten. Das Gefälle und die Wasserspiegellagen dieser Kanäle werden somit maßgeblich vom Wasserspiegel am Einbindepunkt in die Unstrut oberhalb Thamsbrück bestimmt.

- Die alten, kanalisierten Unstrutabschnitte wirken weiterhin als Entwässerungselemente zwischen Altengottern und Thamsbrück. Da sie unterstromig in die mäandrierende Unstrut einbinden, sind die tieferen Wasserpiegellagen der Einbindepunkte für die Altarmwasserspiegel bestimmend. Dies führt zur Absenkung des Grundwasserspiegels, wie er in Abb. 4.2-16 dargestellt ist.

Zielführend im Sinne der Anhebung von Grundwasserständen auch im Altengotternschen Ried kann demzufolge nur sein, den Altengotternschen Kanal unmittelbar südöstlich Altengottern in die Unstrut einzuleiten und die kanalisierten Unstrutaltarme sowie den Restabschnitt des Altengotternschen Kanals zu schließen. Nach den Berechnungen führt diese Variante (EA 4.1) dazu, daß sich im Bereich des Altengotternschen Rieds Druckspiegelhöhen zwischen 1,25 m und 0,25 m unter Gelände einstellen werden.



**Abb. 4.2-16: Berechnete Druckspiegelhöhen der EA 4 und Variante 4.1 im Altengotternschen Ried**



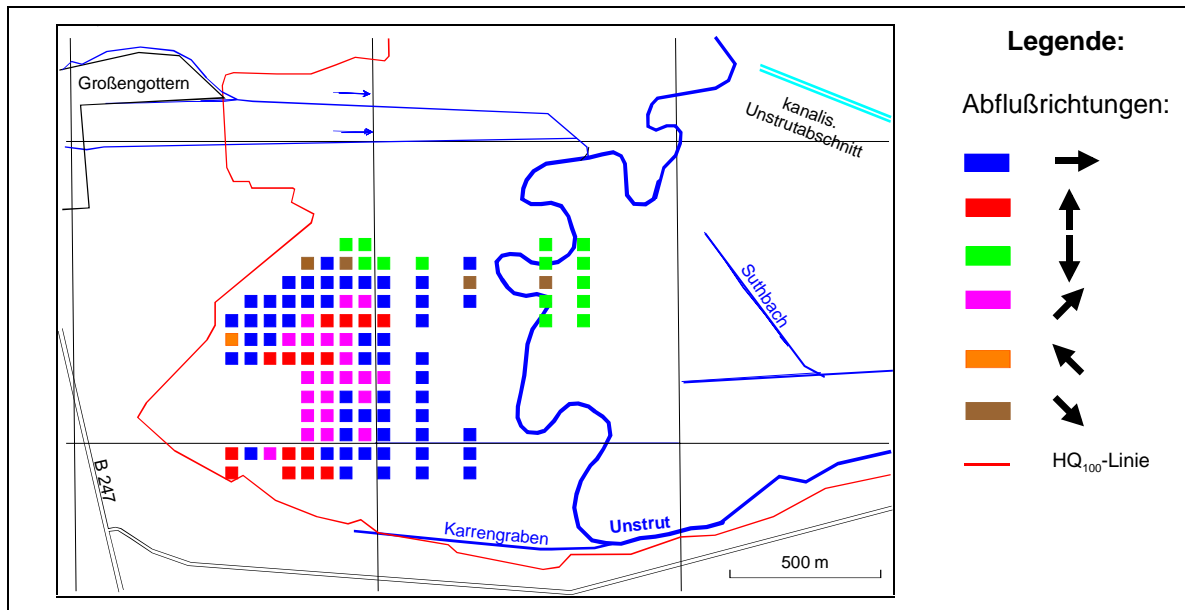
**Abb. 4.2-17: Hochwasser HQ<sub>100</sub> und Grundwasserstände in der Aue in der EA 4**

Auch für die Entwicklungsalternative 4 wurde die Variante eines Hochwassers HQ<sub>100</sub> berechnet. Angenommen wurde eine Hochwasserganglinie der Unstrut in Anlehnung des Hochwassers vom Februar 1946, jedoch mit einer Abklingphase von 24 Tagen, da in dieser Variante die Deiche weitestgehend rückgebaut sind und es zu einer Überflutung entsprechend der vorgelegten Berechnungen von BCE (1998) kommen wird. Das Ergebnis ist in Abbildung 4.2-17 dargestellt.

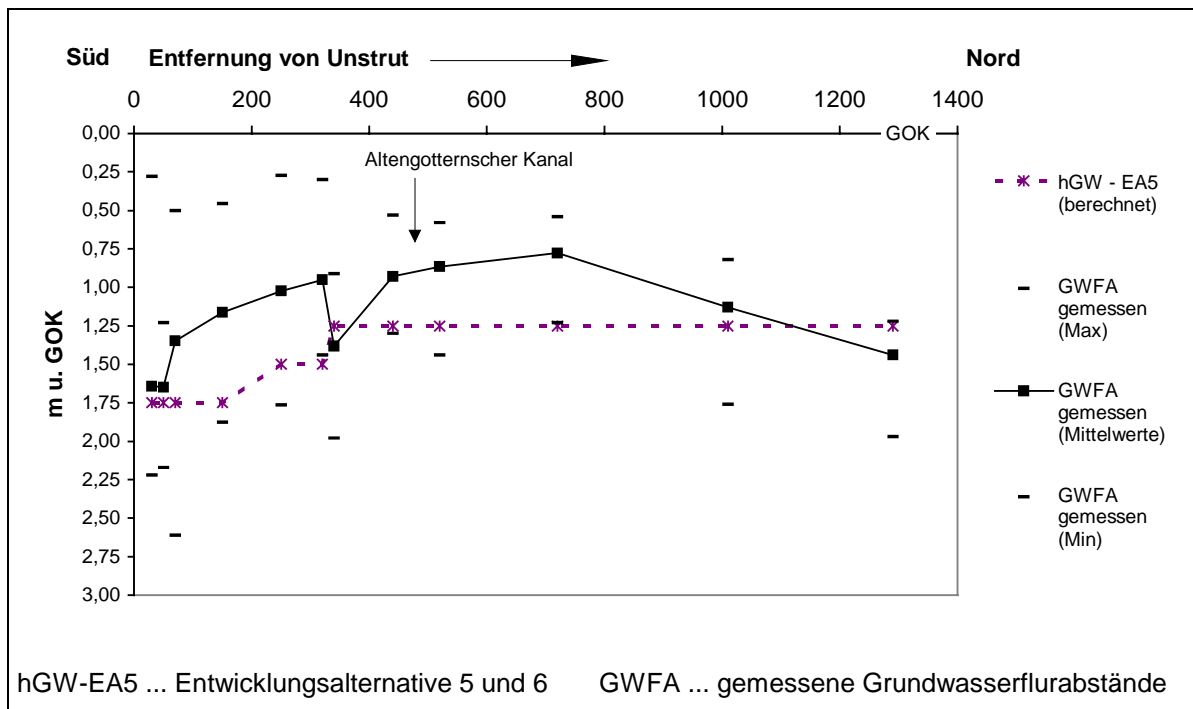
Aufgrund der langen Überflutungszeit (7 - 10 Tage auf den Riedflächen) ist der Anstieg des Grundwassers in der Aue signifikant. Dabei zeigt sich, daß im Großengotternschen Ried die Wirkung des aufsteigenden Grundwassers dazu führt, daß auch nach 25 Tagen noch mit oberflächlich anstehendem Grundwasser (Wasseroffenflächen) als Wirkung der Überflutung zu rechnen ist.

#### 4.2.2.5 Modellierungsergebnisse zu den Entwicklungsalternativen 5 und 6

Mit den in Tab. 3.4-2. dargestellten Randbedingungen wird es im Ergebnis der Modellierung vor allem südöstlich der Ortslage Großengottern zu einem Anstieg der Grundwasserstände kommen, die nach den Druckspiegelhöhen dann bis zur Geländeoberfläche reichen und somit zur Ausbildung von offenen Wasserflächen führen können. Das Abfließen des möglicherweise oberflächlich austretenden Grundwassers geschieht dann entsprechend des natürlichen Geländereiefs und ist in Abb. 4.2-18 dargestellt.



**Abb. 4.2-18: Abflußrichtungen des austretenden Grundwassers im Großengottenschen Ried**



**Abb. 4.2-19: Berechnete Druckspiegelhöhen der EA 5 und 6 im Altengottenschen Ried**

Im Altengottenschen Ried wirken auch in dieser Entwicklungsalternative die alte, kanalisierte Unstrut und der Altengottensche Kanal stark entlastend, jedoch stellen sich, bedingt durch den höheren Wasserpegel der Oberflächengewässer, auch im Altengottenschen Ried höhere Grundwasserstände ein, die dann im Bereich der derzeit gemessenen Grundwasserflurabstände liegen werden (s. Abb. 4.2-19).



### 4.3 Gewässerbeschaffenheit

Für die Auswertung der Beschaffenheitsuntersuchungen wurden zwei Fragenschwerpunkte gesehen:

- Räumliche Differenzierung der Stoffeinträge und Stoffflüsse  
Auf der Grundlage der Untersuchungsergebnisse zur Grundwasserdyamik kann die Differenzierung zwischen Speisungs- und Entlastungsgebiet vorgenommen werden.
- Zeitlicher Verlauf der Wasserbeschaffenheit  
Hier sind Zusammenhänge zwischen Grundwasserdyamik und Wasserbeschaffenheit aufzuklären, weil diese Hinweise auf Stoffumwandlungsprozesse geben, die durch laborative Untersuchungen unteretzt werden sollten.

#### 4.3.1 Räumliche Differenzierung

##### 4.3.1.1 Geogene Beschaffenheitsverhältnisse

Zunächst sollen die geogenen Beschaffenheitsverhältnisse im *Hauptuntersuchungsgebiet* betrachtet werden.

Der geologische Aufbau des Unstruttales mit seinen Gipskeuperschichten im unmittelbaren Liegenden der Talsedimente (s. Kap. 4.1) und dem darunterlagernden Muschelkalk bestimmen maßgeblich die hydrochemischen Verhältnisse des Grundwassers.

In Abbildung 4.3-1 sind die geogenen hydrochemischen Verhältnisse im Speisungs- und Entlastungsgebiet gegenübergestellt. Die Abb. 4.3-1a) und b) zeigen den randlichen Einfluß des Muschelkalks in den Speisungsgebieten. Hier tritt eine stärkere Komponente von  $\text{HCO}_3^-$  auf, die insgesamt zu Grundwässern des Ca-(Mg-)- $\text{SO}_4$ - $\text{HCO}_3^-$ -Typ führen. Daß dieser Einfluß sowohl im Nordwesten des Gebietes als auch im Nordosten des Gebietes vorherrscht, zeigen die beiden Darstellungen der Meßstellen in Höngeda (NW) und am Bahnhof Großwelsbach (SW) (Abb. 4.3-1 c) und d)).

Im Zentrum der Mulde wird der  $\text{HCO}_3^-$ -Einfluß des Muschelkalk-Grundwassers durch die ihm überlagernden Keuperschichten gedämpft. Dies dokumentiert sich an dem Meßwertpool mit  $\text{SO}_4$ -Dominanz. Hier herrscht der Ca- $\text{SO}_4$ -Typ des Grundwassers vor.

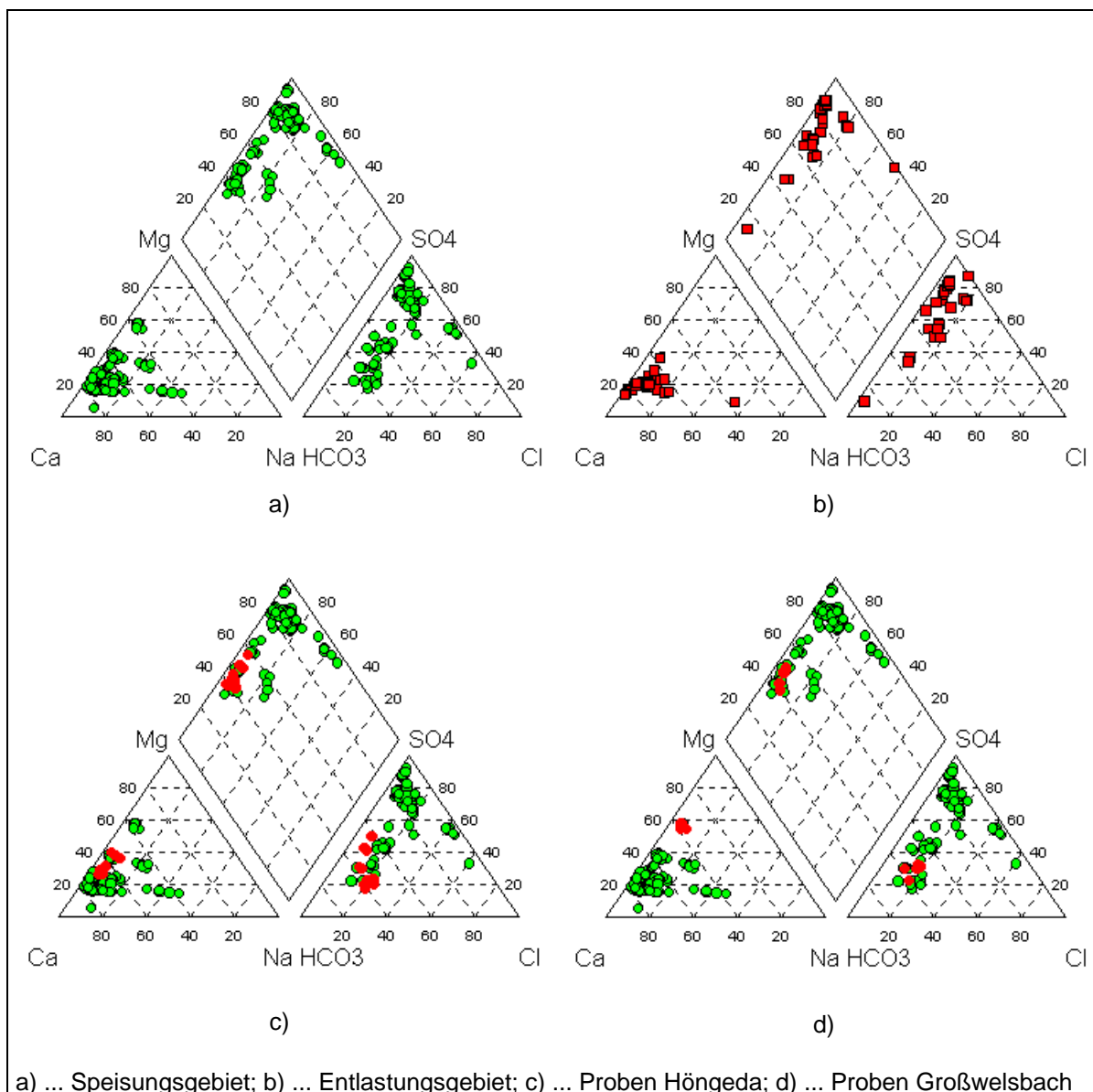
Die Verhältnisse der Quartär-Meßstellen im Entlastungsgebiet sind in Abb. 4.3-1b) dargestellt. Hier zeigt sich, bis auf einige Ausreißer, die  $\text{SO}_4$ -Dominanz im Grundwasser.

Chlorid spielt in den Grundwässern eine untergeordnete Rolle.

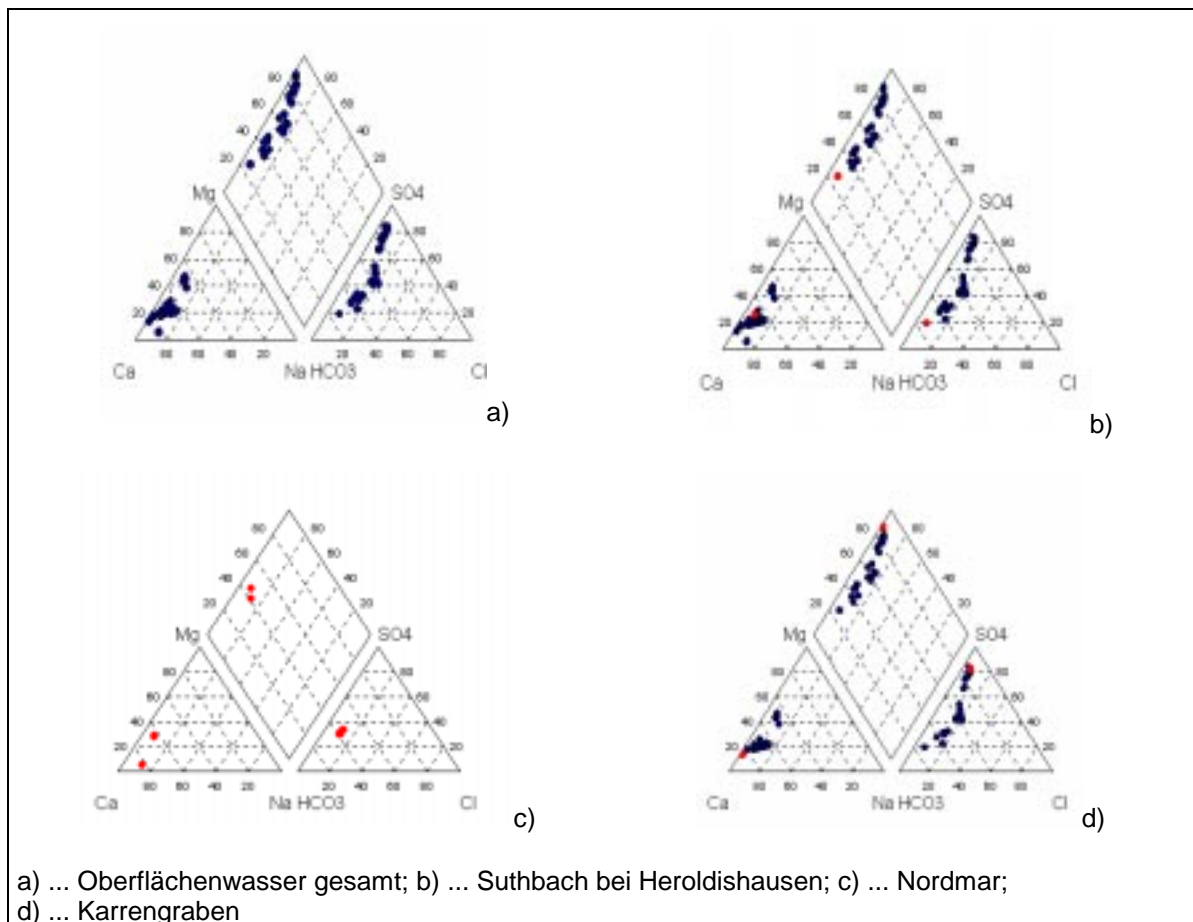
Die regionalen hydrochemischen Verhältnisse lassen sich auch an den Meßergebnissen der Oberflächengewässer nachvollziehen (Abb. 4.3-2). Die fast linienförmige Verteilung der Anionen-Anteile vom karbonatreichen zum sulfatdominierten Wasser machen den integralen hydrochemischen Charakter der Oberflächengewässer deutlich. Bei den sulfatdominierten Proben handelt es sich um die Analysenwerte der Kanalproben bei Altengottern, hier wird die Entlastungsfunktion aus dem Gipskeuper deutlich. Bei den karbonatreichen Wässern handelt es sich um die Oberflächenwasserzuflüsse aus dem Hainich (Nordmar und Suthbach) und dem Langensalzaer Gewölbe (Welsbach). Explizit ist eine Suthbach-Probe bei Heroldshausen hervorzuheben (Abb. 4.3-2b). Wie sich die hydrochemischen Verhältnisse in den Oberflächengewässern ändern, wird an einer Probe

am Nordmar deutlich. Es sind zwei Proben dargestellt, die im Abstand von ca. 4 km entnommen wurden. (Probe 1 oberhalb des Zusammenflusses Ortlesbach - Weberstedter Bach; Probe 2 an der Brücke zur Deponiezufahrt Kalkberg) Die Darstellung in Abb. 4.3-2c zeigt, wie sich das Gewässer auf seinem Wege hydrochemisch verändert.

Die in Abbildung 4.3-2d herausgehobenen Proben des Karrengrabens dokumentieren die Vorflutfunktion dieses Gewässers am südlichen Rand des Großengotternschen Rieds. Es zeigt sich bei den Anionen eine eindeutige  $\text{SO}_4$ -Dominanz, die auf den Zufluß aus der südlich sich anschließenden Gipskeuperaufragung des Schalkenberges zurückzuführen ist.



**Abb. 4.3-1: Hydrochemie des Grundwassers**

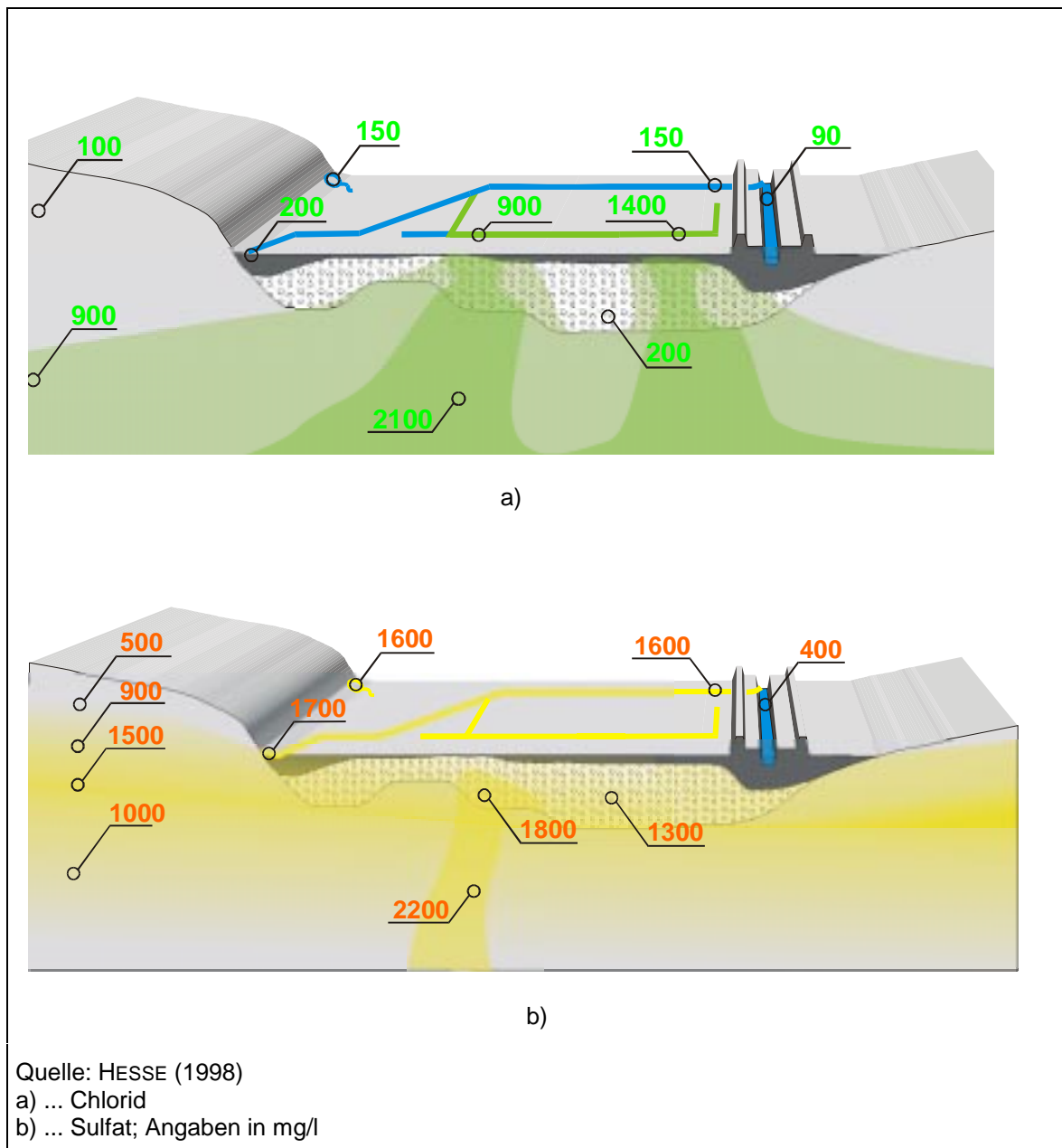


**Abb. 4.3-2: Hydrochemie der Oberflächengewässer**

Die geogene hydrochemischen Verhältnisse des *Untersuchungsgebietes B* sind ausführlich in HESSE (1998) beschrieben. So wird die Wasserbeschaffenheit hier durch die Inhaltsstoffe Na, Ca,  $\text{SO}_4^{2-}$  und Cl bestimmt. Mehrheitlich wurden Wässer vom Ca- $\text{SO}_4$ -Typ angetroffen. Nur in Brunnen, die im unteren Keuper verfiltert sind, tritt bei den Kationen eine Mg-Dominanz durch Dolomit-Lagen im unteren Keuper auf. Dies zeigt sich auch in Meßstellen des Quartär, in Bereichen, wo er von unterem Keuper unterlagert wird, was ein deutliches Indiz auf aufsteigendes Grundwasser in die Talsedimente des Unstruttales ist.

In Meßstellen mit Teufen > 50 m dominieren im Untersuchungsgebiet Sömmerda Wässer des Na-Cl-Types. Hier macht sich der Einfluß des Muschelkalks bemerkbar.

Die generellen hydrochemischen Verhältnisse sind in der Abbildung 4.3-3 dargestellt

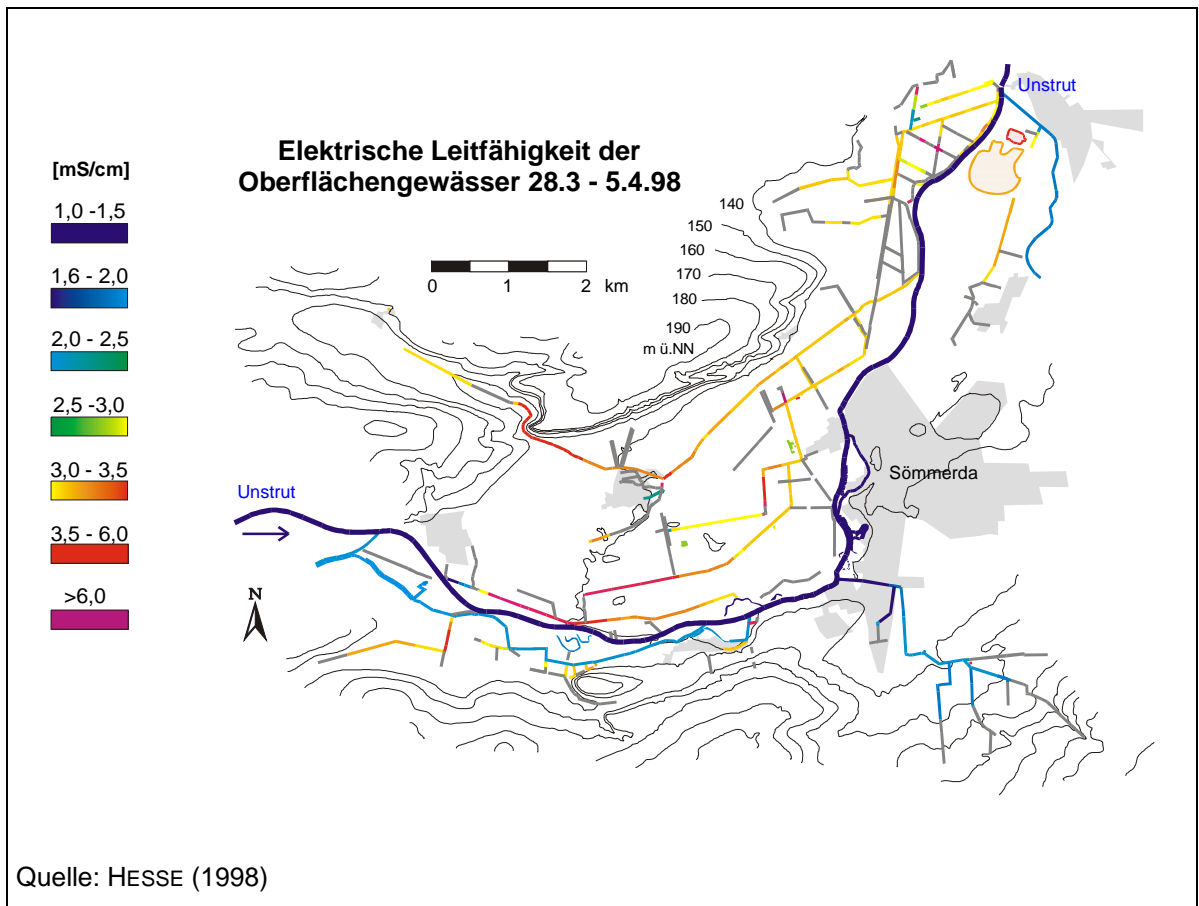


### Abb. 4.3-3: Geogene Hydrochemie in Untersuchungsgebiet Sömmerda

Anhand der dargestellten Schnitte wird die Herkunft der geogenen Stofffracht in den Talsedimenten des Unstruttales deutlich.

Wie diese Zuflüsse sich bis in die Oberflächengewässer durchpausen wird anhand einer Leitfähigkeitskartierung der Gewässer im Raum Sömmerda deutlich (Abb. 4.3-4). Hier zeigen die Gräben der Aue, die die Niederterrasse entwässern, gleiche elektrische Leitfähigkeiten wie die des Mittleren Keupers. "Die ist ein Indiz für die Speisung der Niederterrasse mit Grundwasser aus dem Mittleren Keuper aus der umliegenden Hügellandschaft."

(HESSE, 1998, S. 33).



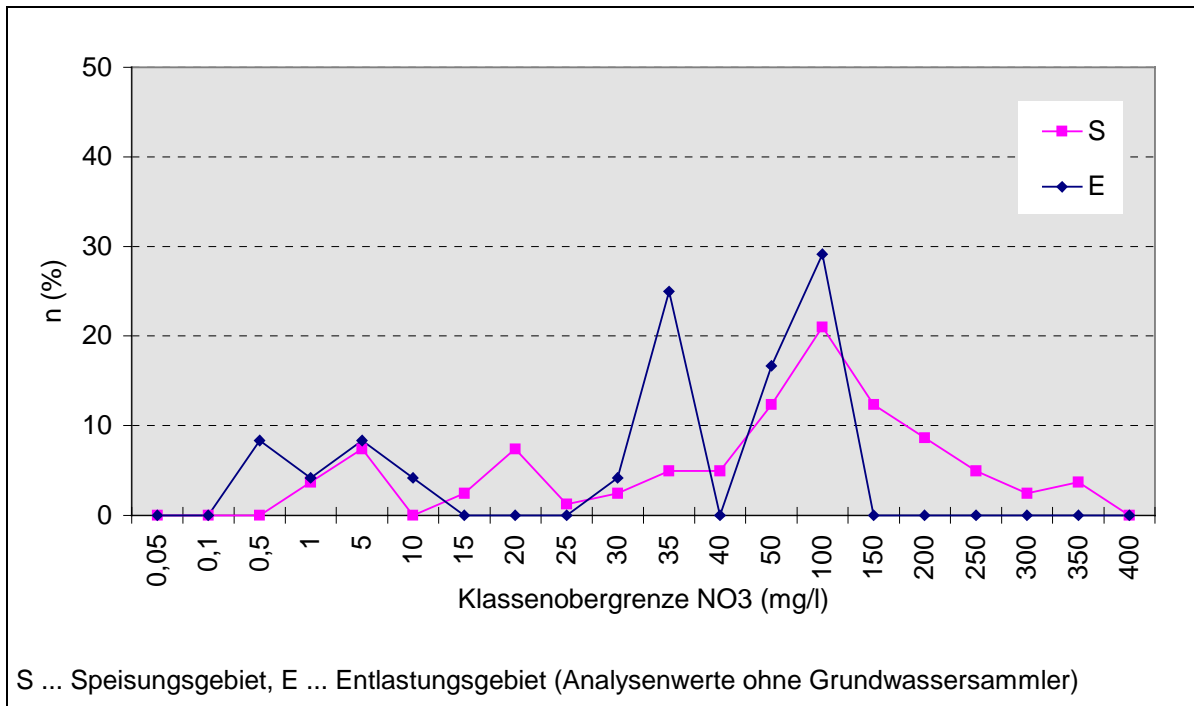
**Abb. 4.3-4: Elektrische Leitfähigkeiten in Oberflächengewässern bei Sömmerda**

### 4.3.1.2 Anthropogene Einflüsse

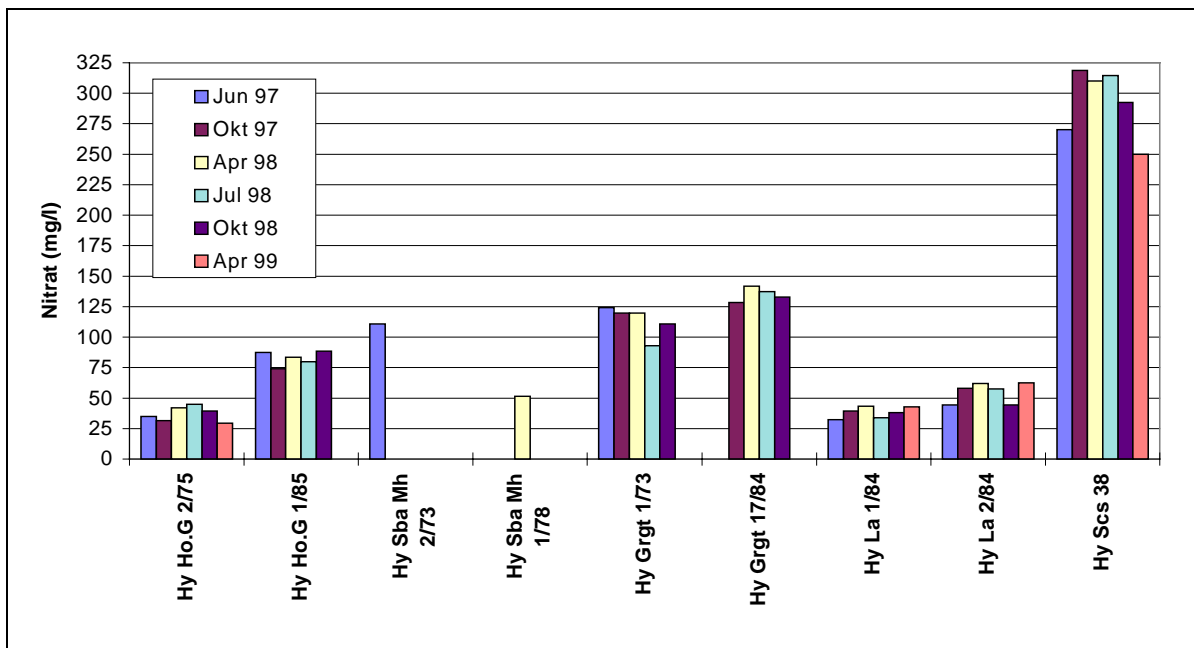
Im Ergebnis der *Grundwasseruntersuchungen* in Teileinzugsgebieten der Unstrut zeigte sich in beiden Untersuchungsgebieten, daß das Grundwasser in den Speisungsgebieten deutlich höhere *Nitrat*gehalte aufweist als in den Entlastungsgebieten. In Abb. 4.3-5 sind die Nitratgehalte in Speisungs- und Entlastungsgebiet des Hauptuntersuchungsgebietes gegenübergestellt. Die Belastung des Speisungsgebietes manifestiert sich vor allem an den Meßstellen in Höngeda (Hy Ho.G \*), Seebach (Hy Sba Mh \*) und Großengottern (Hy Grgt \*). Diese Brunnen zeigen Nitratgehalte zwischen 75 und 140 mg/l. Die Meßstellen in Seebach waren zwar jeweils nur einmal beprobbar, passen sich aber in das Niveau ein.

Die aus dem westlichen Untersuchungsgebiet zugeführte Nitratmenge zeigt sich auch im Pegel 0761 an der Straße Großengottern - Altengottern. In diesem Pegel wurde bei einem Mittelwert für Nitrat von 204,4 mg/l (n = 5; Spannweite: 177,2 ... 230,4 mg/l) der zweithöchste Wert ermittelt. Offensichtlich hat hier der Schilfsandstein eine grundwasserdränierende Funktion für den Zustrom aus dem Speisungsgebiet, was sich in den hohen Nitratgehalten des Pegels zeigt.

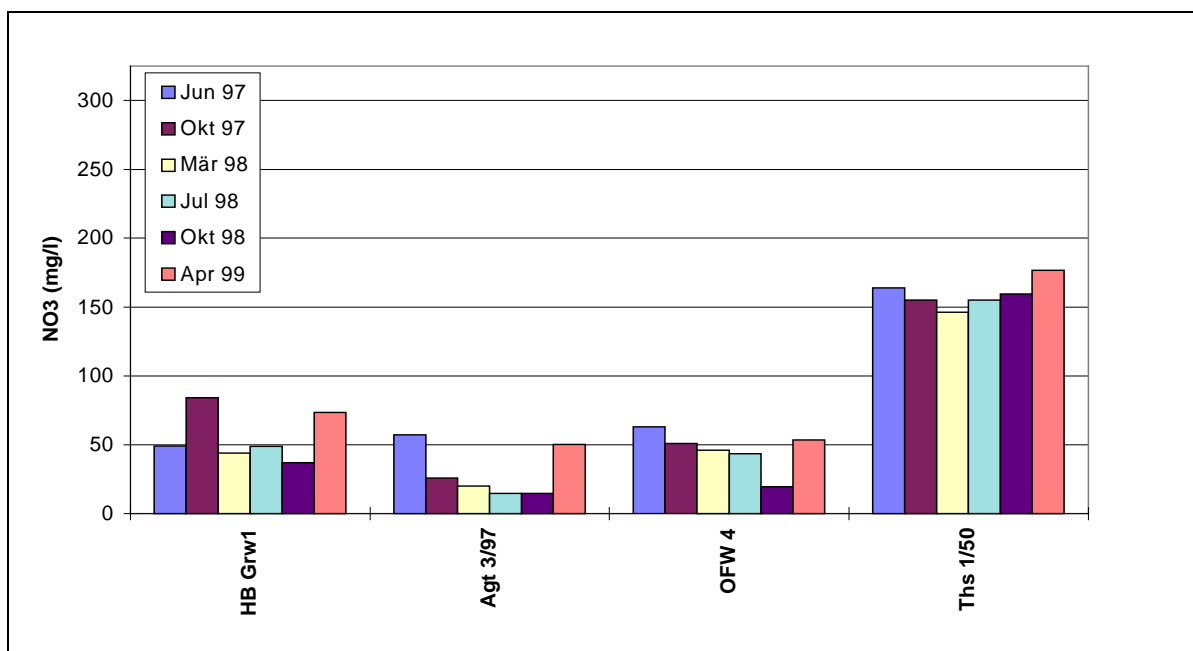
Die Meßstelle mit den höchsten Nitratgehalten ist der Brunnen Hy Scs 38 (Schönstedt). Hier lagen die Meßwerte aller Beprobungen zwischen 250 und 350 mg/l. Auf Grund der besonderen hydraulischen Position dieser Meßstelle (s. Kap. 4.2) ist zwar nicht zu erwarten, daß diese Menge der Unstrutau zugeht, es muß jedoch davon ausgegangen werden, daß, wenn der Brunnen im hydraulischen Kontakt mit dem Orlbach steht, über diesen die Nitratfracht dem Vorfluter Unstrut zugeht. Zu dieser Meßstelle muß auch einschränkend bemerkt werden, daß der Brunnen sich in einer Gärtnerei befindet und dies die Ursache für eine Punktquelle sein kann. Daß aus dem südlichen Bereich des Untersuchungsgebietes insgesamt geringere Mengen eingetragen werden, wird an den Meßstellen Hy La 4/84 (Deponiepegel Kalkberg) deutlich. Schwer zu interpretieren sind allerdings die Meßergebnisse der Meßstellen Hy La 3/84 und Hy Scs 1/87, die Nitratgehalte < 1 mg/l aufweisen. Da diese Größenordnungen jedoch untergeordnet auftreten, muß insgesamt von einer Schadstoffzufuhr aus dem Speisungsgebiet von zwischen 75 und 125 mg/l gerechnet werden.



**Abb. 4.3-5: Nitratverteilung im Grundwasser**



**Abb. 4.3-6: Nitrate im Speisungsgebiet**



**Abb. 4.3-7: Nitrate im Nord-Ost-Bereich des Untersuchungsgebietes**

Der **nordöstliche Rand des Untersuchungsgebietes**, der von einer anderen hydrodynamischen Charakteristik gekennzeichnet ist als der südwestliche, unterirdische Zufluß

(s. Kap. 4.2), zeigt auch bei den Nitratgehalten Unterschiede zu dem südwestlichen Bereich. In Abb. 4.3-6 sind die gemessenen Gehalte in der Meßstelle Agt 1/97 und HB Grw1 aufgetragen. Bei gleicher Skalierung der Darstellung wird deutlich, daß die Meßstellen im Norden (Agt 3/97) und im Nordwesten (HB Grw1) gegenüber den Konzentrationen im westlichen Teil des Untersuchungsgebietes etwa nur halb so hoch sind. Vor allem für die Meßstelle Agt 3/97 ist selbst diese Größenordnung überraschend, da diese Meßstelle bedingt durch den unverkarsteten Gipskeuper nur einen geringen Zufluß hat. Kommt es jedoch hier zu einem Durchdrücken tieferer Wässer aus dem besser durchlässigen Lettenkeuper, dann macht sich in dieser Meßstelle ein Einfluß aus dem weiteren Hinterland bei Bothenheilingen bereits bemerkbar. Auffällig ist weiterhin der Brunnen Thamsbrück (Alte Mälzerei). Dieser Brunnen hat seinen Zufluß aus dem Osten und erreicht mit durchschnittlich 159,4 mg Nitrat/l den dritthöchsten Mittelwert im ganzen Untersuchungsgebiet. Einschränkend muß zur Probennahme an dieser Meßstelle erwähnt werden, daß es sich hierbei um einen Schachtbrunnen handelt. Auf Grund der Nähe zum Unstruttal und dem Potentialgefälle muß davon ausgegangen werden, daß diese Stoffmenge über das Grundwasser der Unstrut (in diesem Falle der Alten Unstrut) zugeleitet wird. Vor dem Hintergrund, daß die nördlich und östlich angrenzenden Gebiete des Untersuchungsgebietes stark landwirtschaftlich genutzt werden, sind insgesamt die gemessenen Nitratgehalte in den Meßstellen von Großwelsbach und Thamsbrück plausibel.

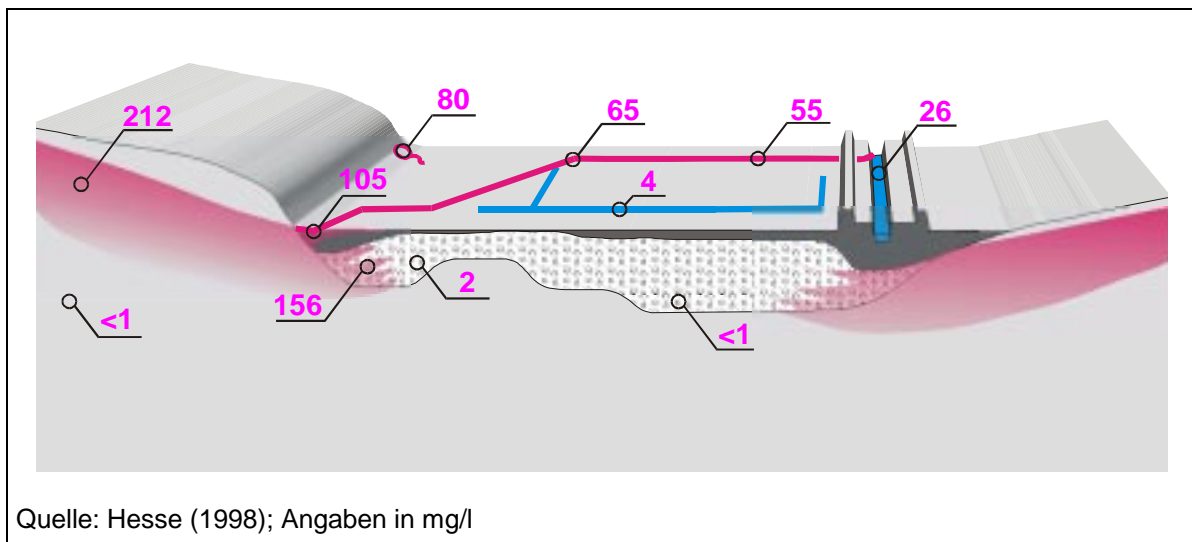
Wie stark landwirtschaftlich bedingte, unmittelbare Stoffeinträge im Norden sein können, zeigen zwei Analysen der Quelle Altengottern (im sog. Fürstenwald nordwestlich der Tongrube Altengottern). Hier wurden 66,45 mg/l (7.7.98) und 75,31 mg/l (3.11.98) Nitrat gemessen. Eine Probe der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (Teilprojekt II) aus



dieser Quelle erbrachte am 27. 7. 98 einen Wert von 66 mg/l und aus einer Quelle nördlich von Altengottern einen Wert von 65,2 mg/l (20.7.99).

Dieser Austrag zeigt sich dann in den Nitratgehalten des Altengotternschen Kanals, der am Meßpunkt OFW K1 die höchsten Nitratgehalte aller Kanalmeßpunkte aufweist (s. Abb. 4.3-12 und erläuternden Text dazu).

Im **Untersuchungsgebiet Sömmerda** zeigt sich ein analoges Bild, was die Verhältnisse zwischen Speisungs- und Entlastungsgebieten betrifft. Die höchsten Nitratgehalte wurden in Grundwässern der Speisungsgebiete gefunden. Wird dieses Grundwasser bereits am Übergang zur Niederterrasse entlastet und tritt dort zutage, dann können die Nitratfrachten über die Passage der Gräben und sonstigen Vorfluter der Unstrut zugeleitet werden und erfahren einen Abbau im Oberflächengewässer, wie die Abbildung 4.3-8 vermittelt. Erst in der längeren Passage des Talgrundwasserleiters kommt es zum Abbau des Nitrats. Wird dieses im Innern der Talaue durch Gräben aufgenommen, zeigen diese Gräben geringere Nitratgehalte.



**Abb. 4.3-8: Nitrat-Konzentrationen des Grundwassers im Gebiet Sömmerda;**

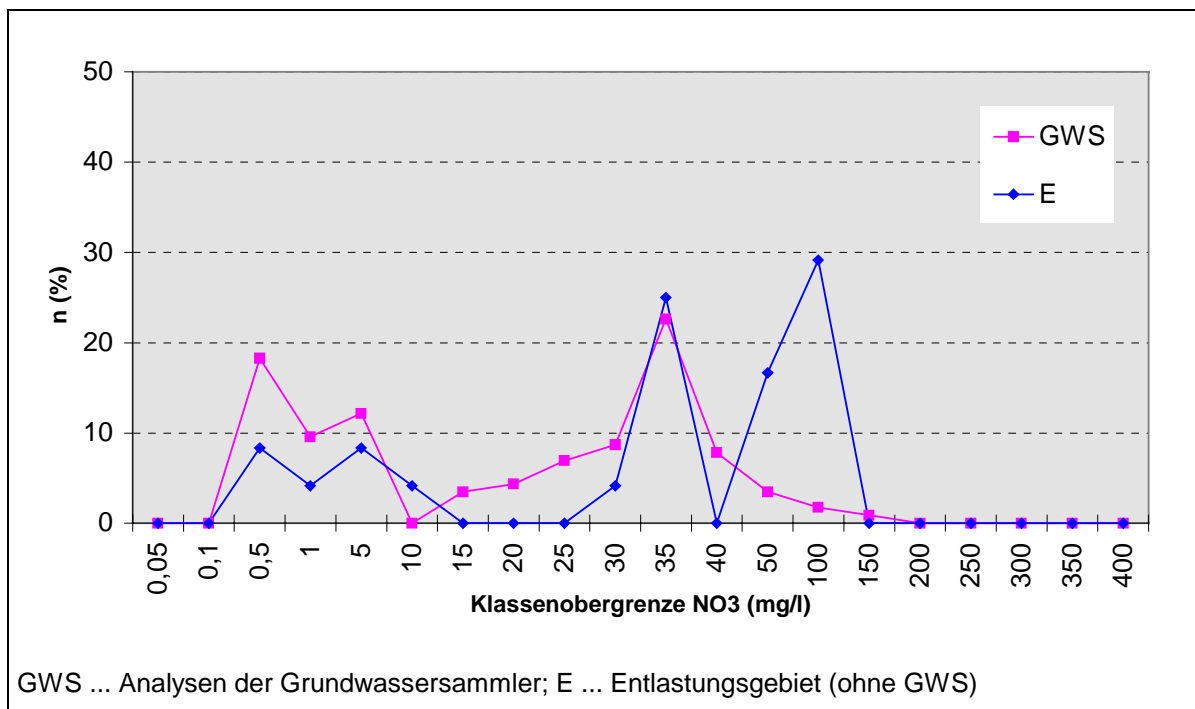
Die Untersuchungen zur Gewässerbeschaffenheit (Grundwasser und Oberflächenwasser) zeigten damit in beiden Untersuchungsgebieten, daß die wesentlichen Stofffrachten für das Grundwasser in der Aue aus den Speisungsgebieten zuströmen. Dies kann für das Untersuchungsgebiet zwischen Bollstedt und Thamsbrück genauso festgestellt werden wie für das Gebiet um Sömmerda. Anhand der Abbildung 4.3-8 wird auch deutlich, daß jede Entwicklungsalternative, die die Einträge auf den Speisungsflächen unberücksichtigt läßt, wesentliche Stoffausträge in das Auengrundwasser nicht zu mindern vermag. Somit kann nur das Reduktionspotential der Auensedimente selbst für die Minderung der Stofffracht genutzt werden. Dazu wurden Untersuchungen im Feld- und im Labormaßstab vorgenommen.

Die in Abbildung 4.3-8 dargestellten Verhältnisse haben sich im Großengotternschen Ried des Untersuchungsgebietes A auch nachvollziehen lassen. Die Beprobung des Karrengrabens, der den südlichen Rand des Großengotternschen Riedes darstellt, erbrachte

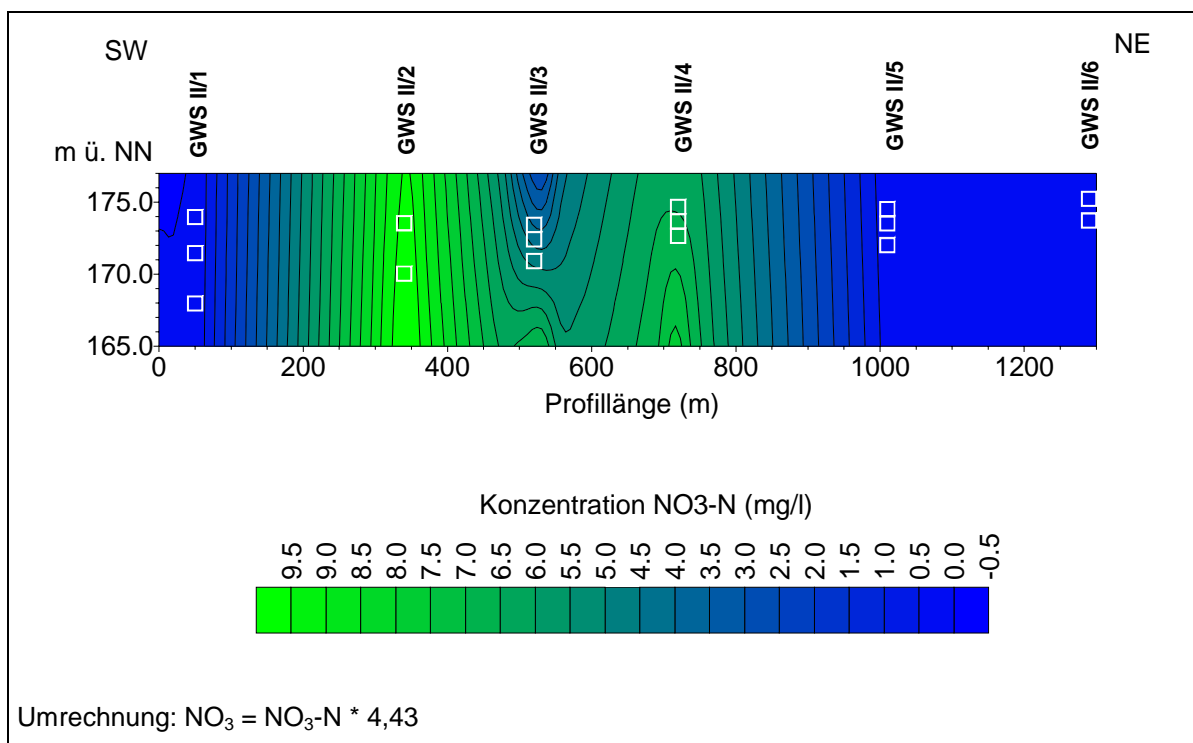
am Beginn des Grabens einen Nitratgehalt von 57,6 mg/l und nach ca. 2,5 km Fließweg einen Nitratgehalt von 42,1 mg/l. Da der Karrengraben das Grundwasser aus dem südlichen Zustrom des Keupers aufnimmt, ist auch diese Stoffbelastung daraufhin zurückzuführen.

Für die Beurteilung des Nitrats in den Auensedimenten wurden die **Analysen der Grundwassersammler** im Altengotternschen Ried herangezogen.

Die Verteilung der Nitratgehalte in den Grundwassersammlern zeigt, daß die Nitratwerte auf einem niedrigeren Niveau liegen als im tieferen Grundwasser des Entlastungsgebietes (Abbildung 4.3-9). Der Häufigkeitspeak der Klassen 40 - 50 und 50 - 100 mg/l fehlt in den Analysen der Grundwassersammler.



**Abb. 4.3-9: Nitratverteilung in Grundwassersammlern des Altengotternschen Rieds**



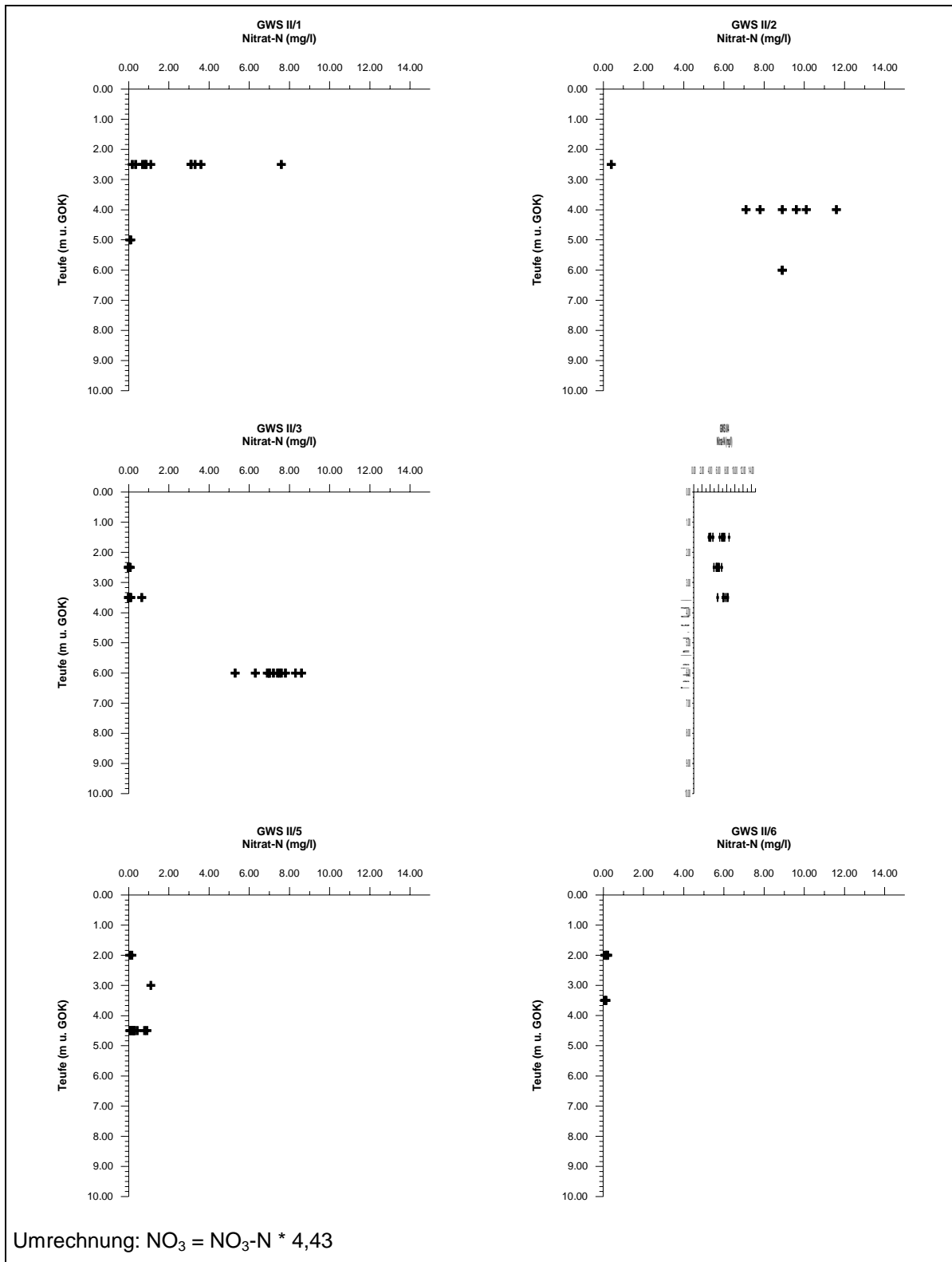
**Abb. 4.3-10: Nitrat-N im Auensediment des Altengotternschen Rieds.**

Die Beprobung der Grundwassersammler im Altengotternschen Ried erbrachte reproduzierbare Aussagen zu den Stoffwandlungsprozessen im Auesediment. Die lokale Verteilung der Nitratgehalte zum Zeitpunkt August 1998 in dem Profil des Altengotternschen Rieds entlang der Sammler GWS II/1 bis GWS II/6 ist in Abbildung 4.3-10 dargestellt und zeigt, wie entsprechend der geologischen Verhältnisse die Nitratgehalte im Auensediment streuen können.

In Abbildung 4.3-11 sind summarisch die Nitratgehalte in den Sammlern dargestellt.

In dieser Darstellung fallen besonders Unterschiede zwischen den Sammlern II/1 und II/3 auf. Im Sammler II/1 zeigen sich im oberen Filterbereich höhere Nitratwerte als im unteren, während im Sammler II/3 im unteren Filter durchgängig höhere Nitratgehalte angetroffen wurden. Bei der Probennahme zeigte sich, daß der obere Filter des Sammlers II/1 im Grundwasserwechselbereich steht. Hier macht sich offensichtlich der vertikal abwärtsgerichtete Stoffstrom bemerkbar, der zu den hohen Nitratgehalten führt. Dies zeigt sich auch an den Ganglinien der Nitratgehalte im oberen Filter (s. Kap. 4.2.2).

Am Beispiel des Grundwassersammlers II/3 kann gezeigt werden, wie es durch den aufwärtsgerichteten Grundwasserstrom zu einer Reduzierung des Nitrats im Auengrundwasser kommt. Der tiefste Sammler zeigt die höchsten Nitrat-Gehalte, während im oberen Sammler die Werte im Bereich der Nachweisgrenze liegen. Somit zeigt sich, daß die wesentlichen Denitrifikationsprozesse unter den Bedingungen kohlenstoffreicher Auensedimente bereits in den tieferen Schichten ablaufen.



**Abb. 4.3-11: Nitratgehalte in den GW-Sammlern (summarisch)**

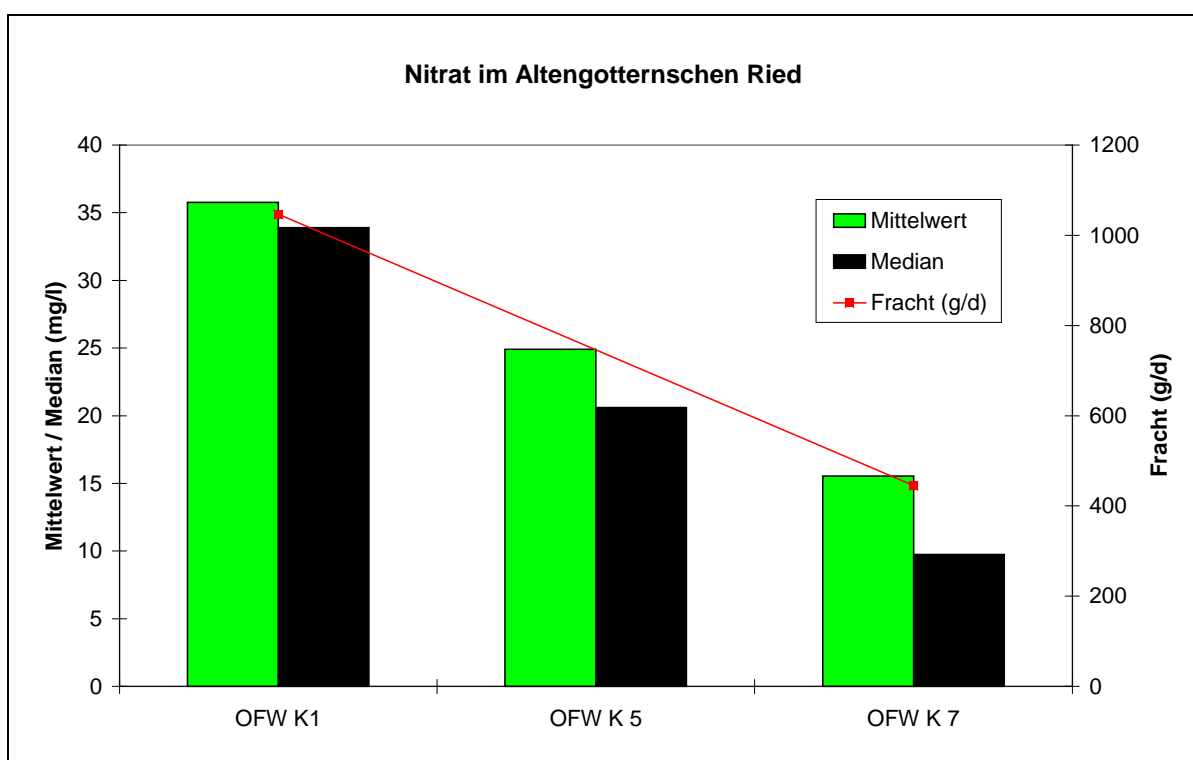
Der untere Filter steht im unmittelbaren Grenzberich der Keuperverwitterungszone und wird demnach durch den aufwärtsgerichteten Grundwasserstrom mit der Stofffracht des

Keupers belastet. Die Konzentrationen in diesem unteren Sammler entsprechen denjenigen des Grundwasserpegels Agt 1/97o, der im Pleistozän steht.

Eine derartig abnehmende Tendenz vom Liegenden zum Hangenden ist auch im Sammler II/4 erkennbar, wenngleich in dessen oberen Filter eine stärkere Streuung der Meßwerte zu verzeichnen ist. Dies kann geologische Ursachen haben. Beim Niederbringen des Flachpegels II/4 wurden an diesem Punkt Sande und z.T. Kiese erbohrt. Dabei handelt es sich offensichtlich um alte Talsande des früher an dieser Stelle verlaufenden Welsbaches. Dies klastischen Talsedimente besitzen ein vermindertes Reduktionspotential für Nitrat, was die höheren Gehalte an Nitrat in dem Sammler erklärt.

Dieser Effekt kann auch im Sammler II/2 vermutet werden, dessen Filter 3,5 - 4,5 m im Bereich einer schluffigen Sandschicht im Liegenden des Torfes steht. Diese Sandschicht kann zu einem verminderten Nitratabbau führen. Mit derartigen Sandschichten im Auensediment muß aber auch davon ausgegangen werden, daß diese zu einem "Sandwich-Effekt" in der Art führen, daß durch höhere hydraulische Leitfähigkeiten Stofftransporte auch in horizontaler Richtung stattfinden.

Im Bereich der Oberflächengewässer sind anthropogene Einflüsse durch die Untersuchungen ebenso erkennbar. So zeigt der Kanal Altengottern mittlere Nitratgehalte (bezogen auf den Untersuchungszeitraum) von 15 bis 35 mg/l. Durch die Analysenwerte ist auch zu erkennen, daß die Nitratkonzentrationen von der Probenahme stelle OFW K1 (nördlich Altengottern) bis OFW K7 (Höhe Versuchsflächen/Rindergehege) auf die Hälfte abnehmen (s. Abb. 4.3-12). Eine Frachtberechnung vom April 1998 zeigt, daß die Fracht in fast dem gleichem Maße sinkt. Der Kanal nimmt demzufolge auf dem Weg durch das Altengotternsche Ried kaum Nitrat mit dem Grundwasser auf, was durch die Beprobung des Grundwassersammlers II/3 bestätigt wird. Dieser Sammler liegt in unmittelbarer Nachbarschaft zum Kanal.



### Abb. 4.3-12: Nitrat im Altengotternschen Kanal

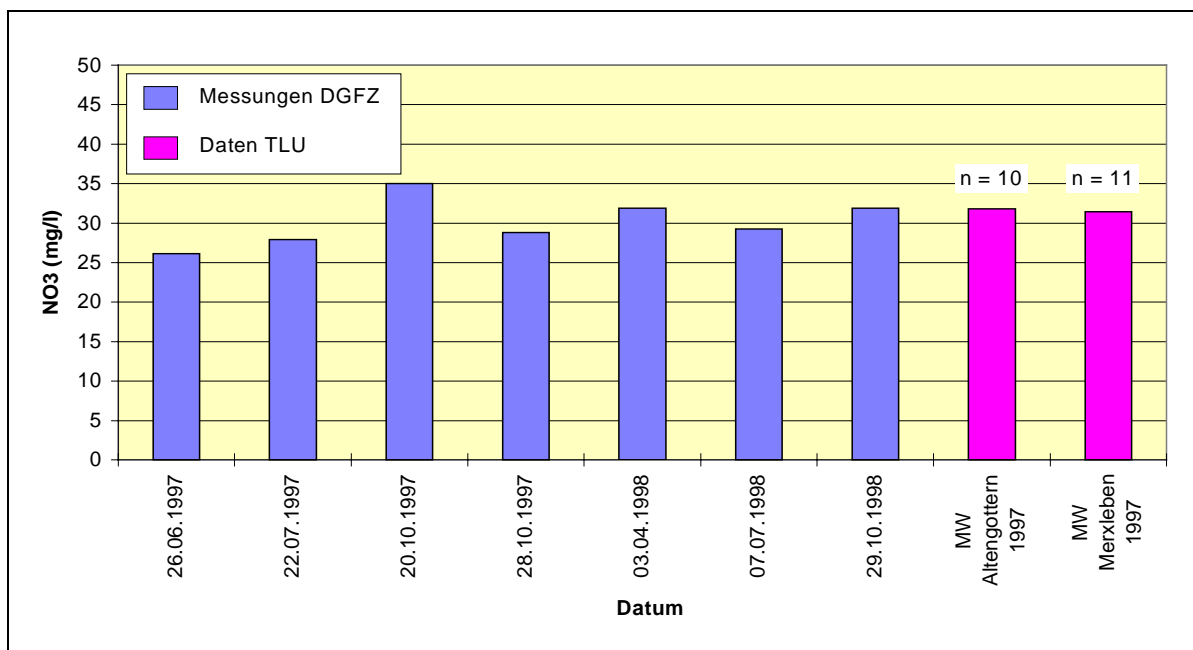
Die Nitratgehalte in der Unstrut wurden im Projektzeitraum am Wehr Thamsbrück gemessen. Sie sind in Abb. 4.3-13 den Daten (Mittelwerte aus dem Jahr 1997) der TLU gegenübergestellt und zeigen eine plausible Übereinstimmung.

Mit den Daten der TLU konnten keine Frachtberechnungen vorgenommen werden, da Durchflußdaten bei Altengottern und Merxleben nicht vorlagen. Da im April 1998 aber eine Durchflußmessung bei Altengottern durchgeführt wurde, und die Thamsbrücker Daten die gleichen Größenordnungen aufweisen wie die Messungen der TLU, wurde mit dem gemessenen Durchfluß bei Altengottern und dem Meßwert bei Thamsbrück zu gleichen Punkten die Fracht berechnet. Es ergibt sich aus der Beziehung:

$$F = Q \cdot c$$

mit:  $Q = 7.285 \text{ m}^3/\text{h}$   
 $c = 31,9 \text{ mg/l}$

eine  $\text{NO}_3$ -Fracht von  $F = 283,9 \text{ kg/h}$ , das entspricht einem Wert von  $5,733 \text{ t/d}$ .

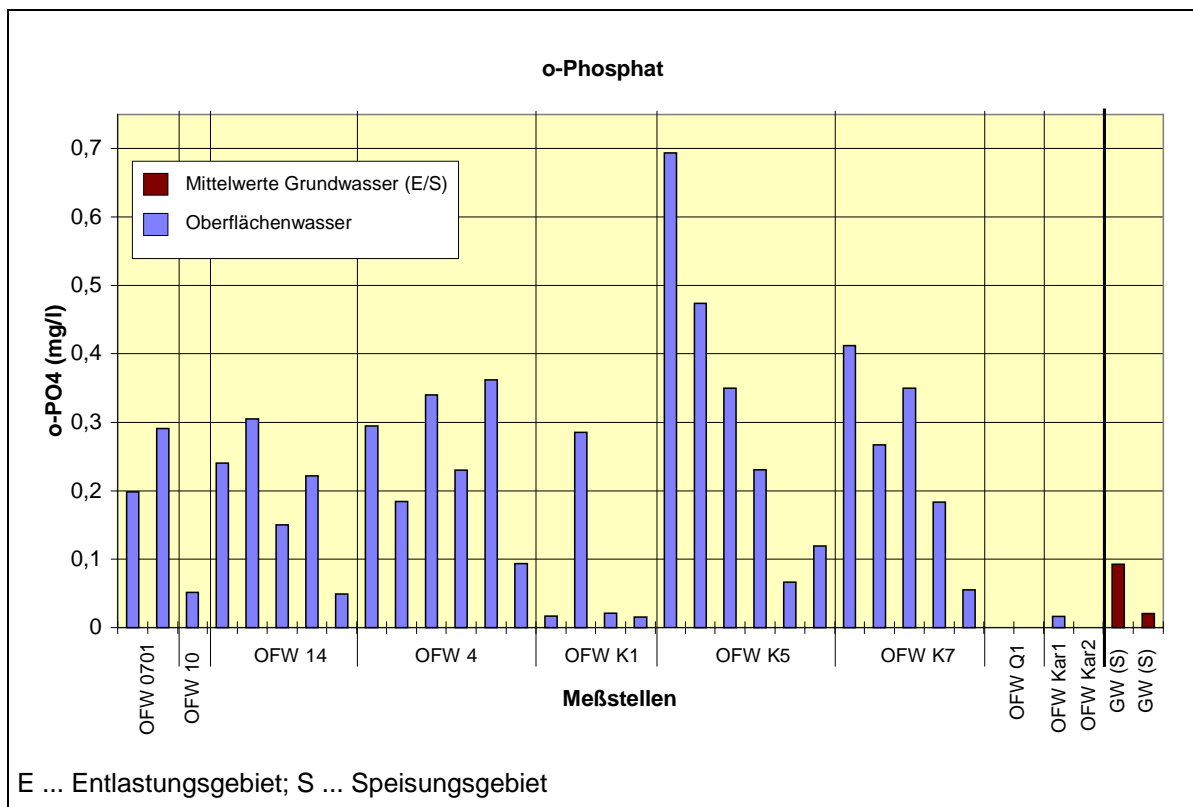


### Abb. 4.3-13: Nitratgehalte der Unstrut bei Thamsbrück

Von weiteren anthropogenen Stoffeinträgen wurden Phosphat und Pflanzenschutzmittel untersucht.

Da **Phosphate** vor allem auf dem Wege der Erosion den Vorflutern direkt zugehen, sollen vor allem die Phosphatgehalte in den Oberflächengewässern betrachtet werden. In Abbildung 4.3-14 sind die Phosphat-Gehalte der beprobten Oberflächengewässer summarisch dargestellt und den Mittelwerten der Phosphatgehalte im Grundwasser des Speisungs- und des Entlastungsgebietes gegenübergestellt.

Der auffällige Wert von 0,7 mg/l der Kanalprobe OFW K5 (direkt unterhalb der Ortslage Altengottern) kann auf Eintrag von Waschwasser zurückzuführen sein, das oberhalb der Entnahmestelle in den Kanal eingeleitet wird. An den Proben OFW Q1 ist zu erkennen, daß über den Grundwasserpfad aus den Speisungsgebieten kein Phosphat zugeleitet wird. Diese Proben stammen von der Quelle Altengottern unterhalb des Roten Berges, in ihr konnte zu beiden Probennahmen kein Phosphat nachgewiesen werden. Auffällig sind auch der geringe Gehalt von Phosphat im Karrengraben (OFW Kar1 und OFW Kar2). Obwohl dieser Graben unmittelbar in Nachbarschaft zu einem Geländeabbruch liegt, der Erosion und damit Eintrag von Phosphat begünstigt, zeigen diese Proben mit 0,016 mg/l und < 0,01 mg/l äußerst geringe Werte, was mit den Zuflußbedingungen in den Graben zusammenhängen kann. Wie bereits durch die Analyse der geogenen hydrochemischen Verhältnisse aufgezeigt wurde, wird dieser Graben aus dem Keuper-Wasser gespeist, was die geringen Phosphatgehalte in diesem Gewässer erklärt.



**Abb. 4.3-14: Phosphatgehalte in Oberflächengewässern**

Die Oberflächenwasserproben OFW 0701 und OFW 14 stammen von der Unstrut bei Thamsbrück. Sie zeigen mit Gehalten zwischen 0,15 und 0,3 mg/l mittlere Gehalte innerhalb der untersuchten Proben. Auch hier zeigt sich somit der integrierende Charakter des Vorfluters.

Eine Frachtberechnung konnte auch hier zum Zeitpunkt April 1998 vorgenommen werden. Mit einer Konzentration von 0,15 mg/l an o-Phosphat in Thamsbrück und einer Durchflußmenge von 7.626 m<sup>3</sup>/h der Unstrut bei Thamsbrück ergibt sich eine Fracht von 1,11 kg/d an Phosphat. Dazu trägt der Kanal Altengottern mit einer abgeschätzten Fracht von

0,13 kg/d bereits mit 12 % zur Phosphatfracht der Unstrut bei. Dieser Wert wurde berechnet mit dem Mittelwert der Phosphatwerte an der Meßstelle OFW K7 (0,253 mg/l) bei einer im April gemessenen Durchflußmenge an gleicher Stelle von 22,03 m<sup>3</sup>/h.

Zweimal wurden im Untersuchungszeitraum Untersuchungen auf *Pflanzenschutzmittel* durchgeführt (s. Tab. 3.3-2). In der ersten Beprobungsrunde (Oktober 1997) wurden in Absprache mit dem TP II folgende Stoffe untersucht (mit Nachweisgrenze in µg/l):

Napropamid (0,06)  
Trifluralin (0,251)  
Delta-Methrin (0,056)  
Dichlorprop (0,035)  
Pirimicarb (0,015)  
Terbutylazin (0,214)  
Cyproconazol (0,020)  
Biphenox (0,560)  
Ioxynil (5,890)  
Prochloraz (4,110)  
Bromoxynil (5,580).

In keiner der 10 Grundwasserproben wurden die untersuchten Stoffe nachgewiesen. Bei den Grundwasserproben handelte es sich sowohl um Proben aus dem Speisungsgebiet (6) als auch aus dem Entlastungsgebiet (4).

Das Screening der Beprobung April 1998 erbrachte Ergebnisse, die keine Spezifizierung einzelner Pflanzenschutzmittel zulassen (s. Tabl 4.3-1).

Tabelle 4.3-1: Dedektierte Substanzen des PSM-Screenings

Meßstelle	Dedektierte Substanzen
Hy Scs 38 (Speisungsgebiet)	natürliche Ester (mehrfach), aliphatische Kohlenwasserstoffe,
Agt 1/97 (u) (Entlastungsgebiet Keuper)	natürliches Wachs; Cyanocyclohexen (?); möglicherweise Metabolit; natürliche Ester (mehrfach),
Agt 1/97 (o) (Entlastungsgebiet Pleistozän)	natürliche Ester (mehrfach), Huminstoff(bruchstücke), Terpen (evtl. Limonen)
Agt 2/97 (Entlastungsgebiet Keuper)	natürliches Wachs, natürliche Ester (mehrfach), Alkene od. Alkohol, Methylbezoensäuremethylester

Da es sich um ein Screening handelte, wurden keine Konzentrationsangaben gemacht.

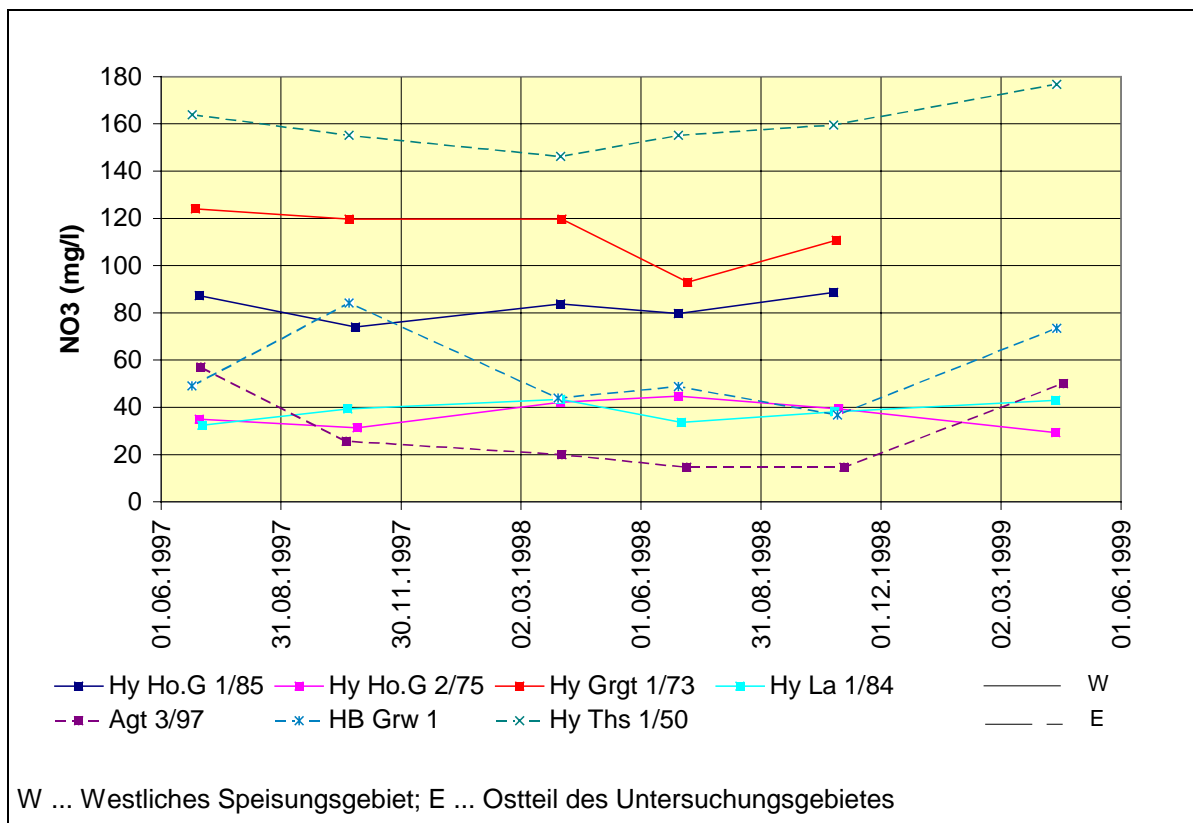
Aus den Ergebnisse läßt sich schlußfolgern, daß für das Grundwasser des Keupers und damit für den Zufluß aus dem Speisungsgebiet - zumindest im Untersuchungszeitraum - die Pflanzenschutzmittel keine Relevanz besaßen.



### 4.3.2 Zeitliche Entwicklung der Beschaffenheit

Nitratgehalte unterliegen in der Regel einem starken Schwankungsverhalten. Nach TLU (1994) wird für Thüringer Meßstellen ein Jahresgang mit einer Schwankungsbreite von ca. 15 mg/l NO<sub>3</sub> angegeben. Außerdem ist seit 1977 über einen Zeitraum von 20 Jahren die Konzentration um jährlich durchschnittlich 1 mg/l NO<sub>3</sub> angestiegen.

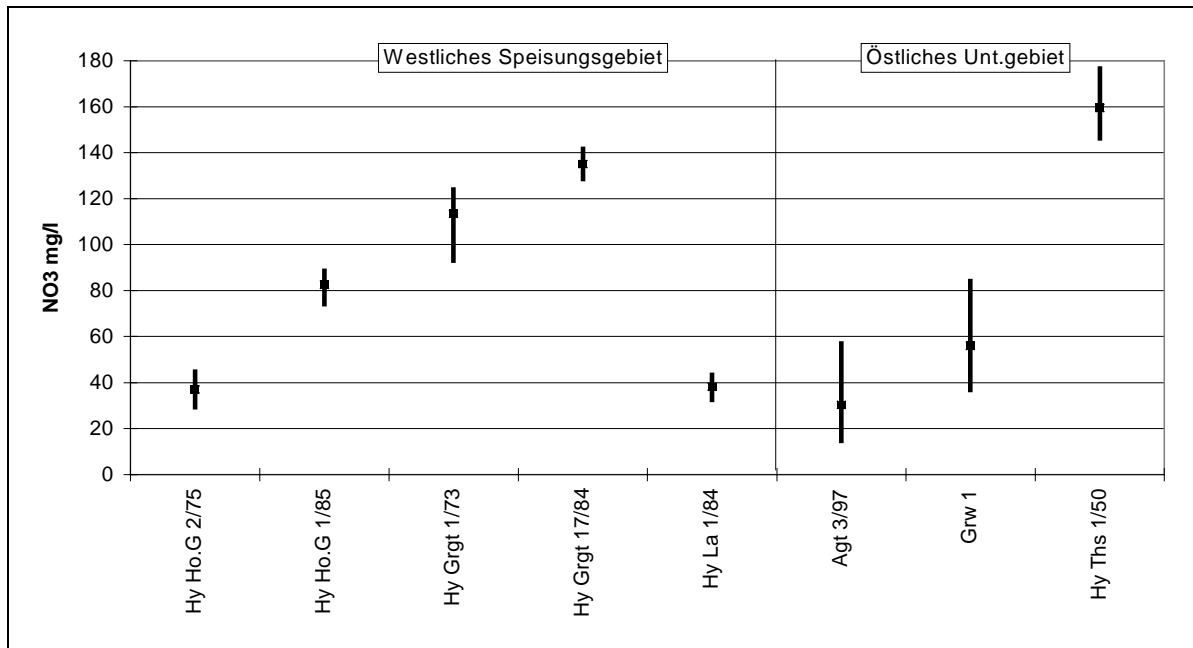
Die zeitliche Entwicklung der Nitratgehalte in ausgewählten Meßstellen des Speisungsgebietes ist in Abbildung 4.3-15 dargestellt.



**Abb. 4.3-15: Nitratganglinien in Speisungsgebiet und östlichem Untersuchungsgebiet**

Da im Untersuchungsgebiet keine Staatliche Beschaffenheitsmeßstelle der untersuchten Grundwasserhorizonte vorhanden ist, können die erhobenen Daten nicht in einem langjährigen Trend eingepaßt und nur untereinander vergleichend bewertet werden. Im Vergleich zwischen westlichem Speisungsgebiet und östlichem Untersuchungsgebiet, das, wie in Abschn. 4.2.1 ausgeführt, eine andere Grundwasserdynamik zeigte, sind Unterschiede auch in den Ganglinien der Nitratgehalte erkennbar. So zeigt das westliche Speisungsgebiet im Juli 1998 die niedrigsten Nitratgehalte, während im östlichen Untersuchungsgebiet die niedrigsten Nitratgehalte erst im Herbst gemessen wurden. Offensichtlich machen sich hier die entfernteren Speisungsgebiete und die geringeren Durchlässigkeiten der z.T. unverkarsteten Gipskeuper-Schichten auch in der Charakteristik der Nitratganglinien bemerkbar.

Die Streubreiten der Nitratwerte liegen in den westlichen Speisungsgebieten mit Werten um 14 mg/l NO<sub>3</sub> insgesamt niedriger als in dem östlichen Untersuchungsgebiet, wo die Streubreiten zwischen 30 und 45 mg/l NO<sub>3</sub> betragen (s. Abb. 4.3-16). Eine größere Streubreite im westlichen Speisungsgebiet zeigt nur die Meßstelle Hy Grgt 1/73 mit 31 mg/l NO<sub>3</sub>.



**Abb. 4.3-16: Mittelwerte und Streubreiten Nitrat (ausgewählte Meßstellen der Speisungsgebiete)**

Die unterschiedlichen Streubreiten der Meßwerte können durchaus auf unterschiedliche geologische Gegebenheiten zurückgeführt werden. Die stärkeren Lößbedeckungen im westlichen Untersuchungsgebiet (s. Anl. I/4-1) dämpfen bewirtschaftungsbedingte "Nitrat-Peaks" und führen zu einem zeitlich ausgeglicheneren Stoffaustrag. In dem östlichen Untersuchungsgebiet, wo die Lößdecken wesentlich weniger Verbreitung finden, wirkt sich das Kluffregime des Keuper-Tonsteins offensichtlich auf den vertikalen Stofftransport unmittelbarer aus (preferential flow), was zu kurzzeitigem Durchbrechen von bewirtschaftungsbedingten Nitrat-Peaks führen kann. Die Meßergebnisse am Lysimeter A4 (TP 2) belegen diese Schlußfolgerung.

Die zeitliche Entwicklung der Nitratgehalte im Entlastungsgebiet soll anhand der Meßergebnisse der Grundwassersammler II/1 und II/4 erläutert werden. Hierzu sind die Ganglinien der einzelnen beprobten Horizonte zu vergleichen (s. Abb. 4.3-17). (Auf Grund der logarithmischen Darstellung konnten Gehalte < NWG nicht dargestellt werden). Schwankungen im Nitratgehalt im Bereich der Grundwasseroberfläche, wie sie in diesen oberen Filter der Sammler angetroffen wurden, müssen demnach auf den direkten Einfluß der Bewirtschaftung zurückgeführt werden.

Anhand des Vergleichs der Streubreiten (Abb. 4.3-18) wird vor allem an den Sammlern II/1, II/4 und II/6 deutlich, wie die jeweils oberen Filter einer größeren Schwankung der Nitratgehalte unterliegen als die tieferen Filterbereiche. Der Einfluß des vertikal

abwärtsgerichteten, bewirtschaftungsbedingten Stoffstromes in den oberen Zonen des Grundwassers im Entlastungsgebiet wird hier deutlich (s.a. Bericht TP 2).

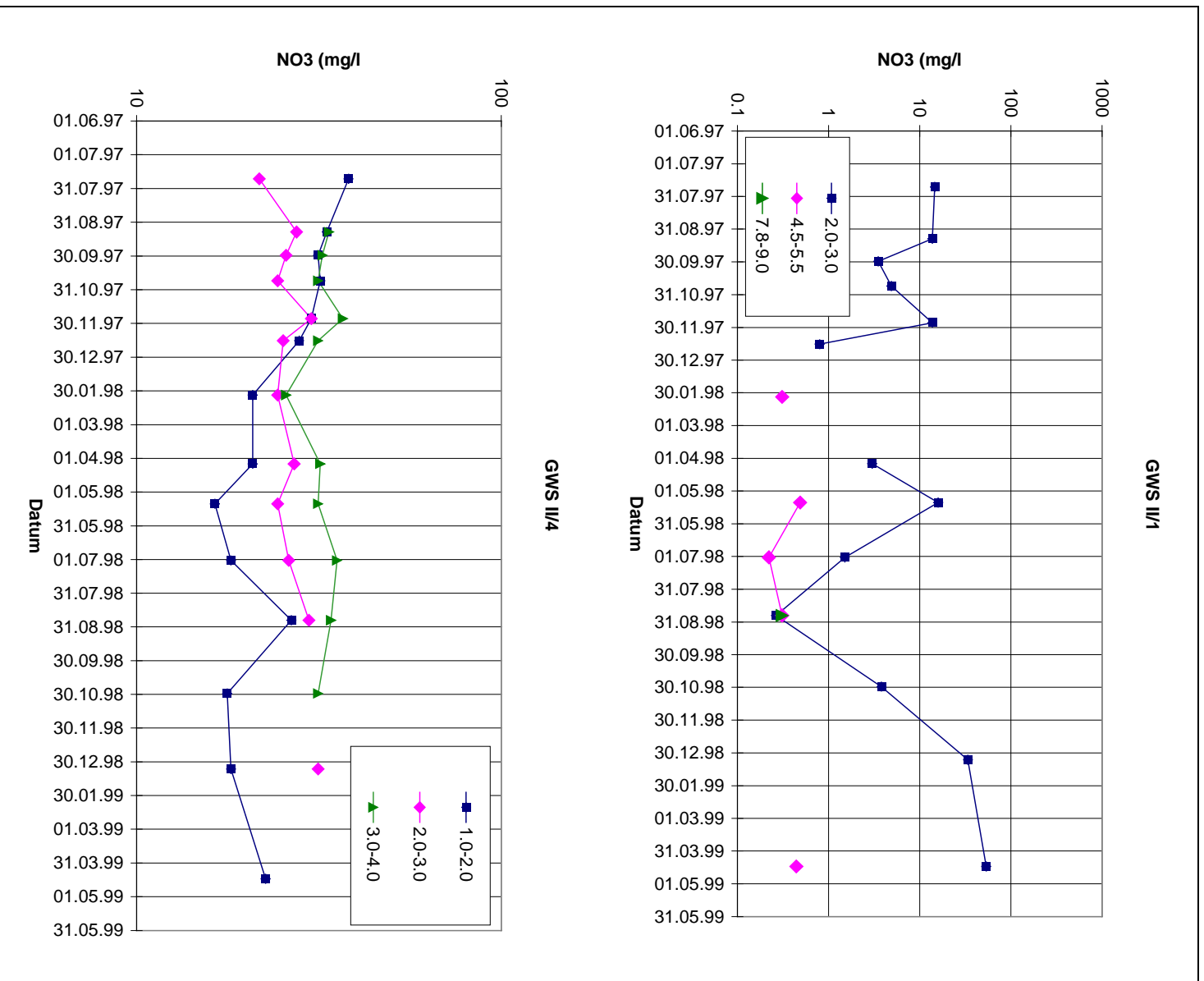
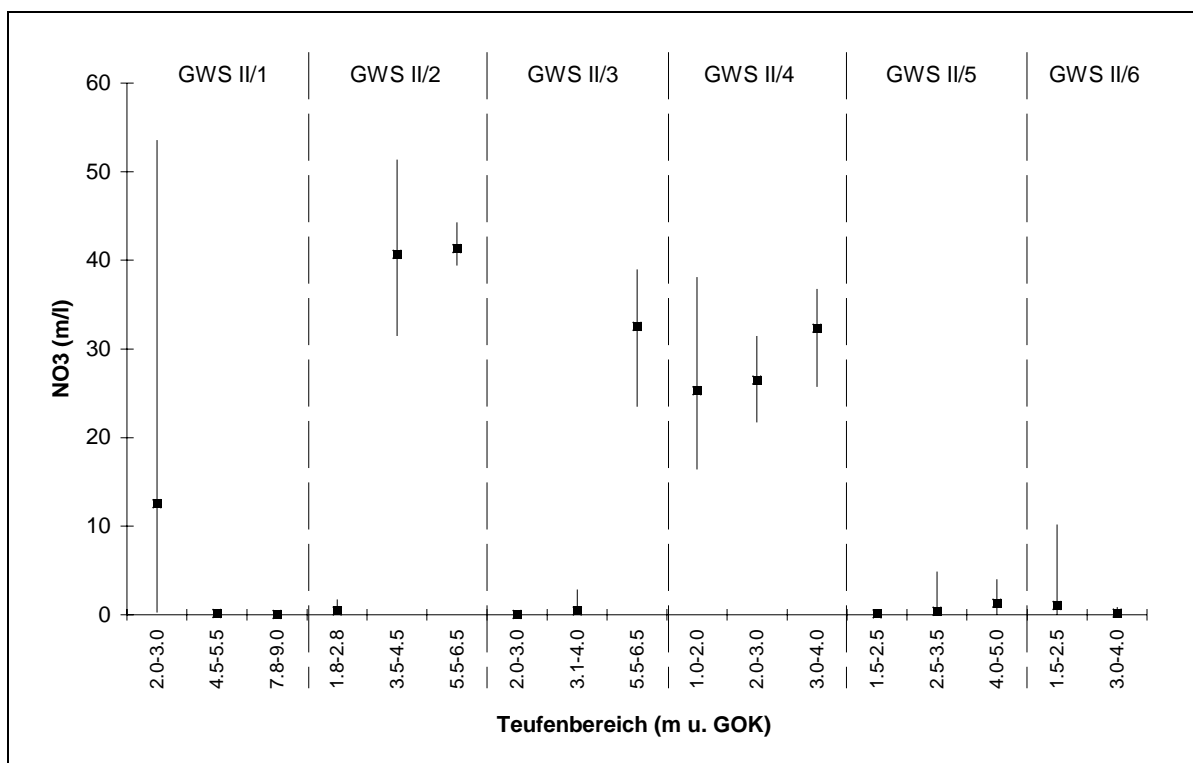


Abb. 4.3-17: Nitratganglinien in Grundwassersammlern



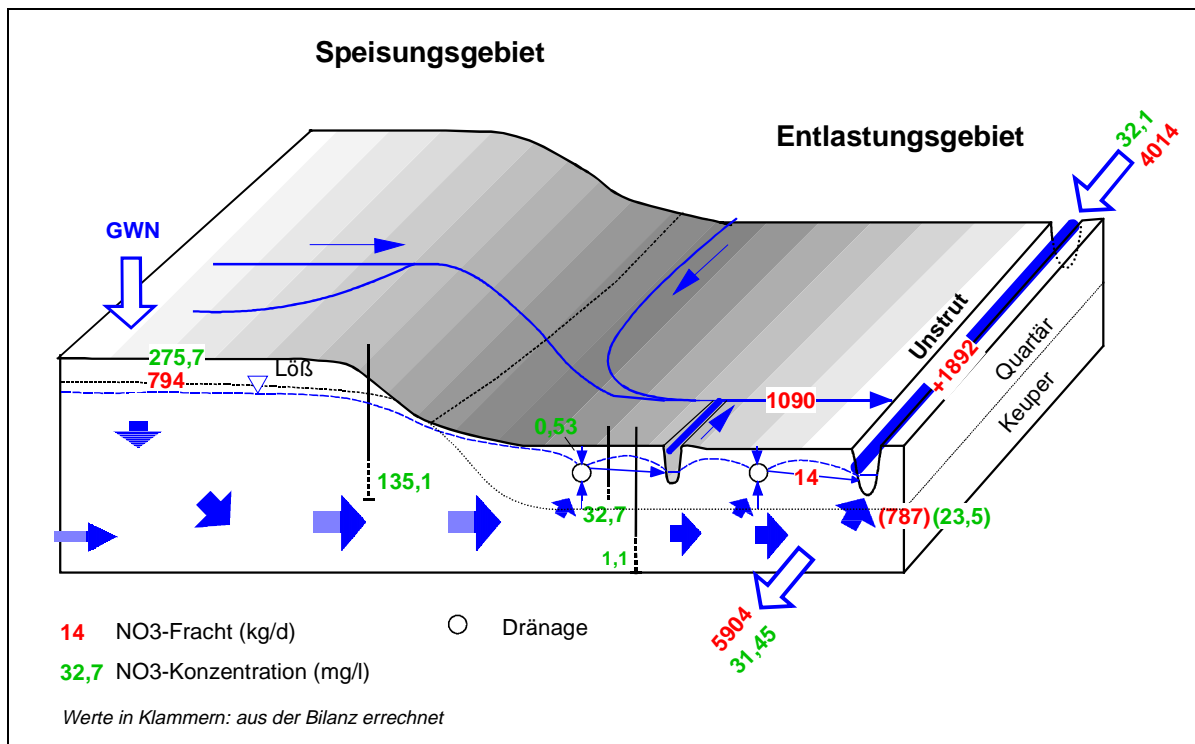
**Abb. 4.3-18: Mittelwerte und Streubreiten Nitrat in den Grundwassersammlern**

### 4.3.3 Stoffbilanzmodell

Anhand der Untersuchungsergebnisse zur Gewässer- und Grundwasserbeschaffenheit in Speisungs- und Entlastungsgebieten soll im folgenden ein Stoffbilanzmodell für das Hauptuntersuchungsgebiet aufgestellt werden. Ziel dieses Stoffbilanzmodells ist es, die Anteile der Stoffströme von den Eintragsflächen zum Vorfluter zu quantifizieren. Dieses Stoffbilanzmodell geht von folgenden Größen aus:

- Mittelwerte der Beschaffenheit im Grundwasser aus dem Untersuchungszeitraum; zu diesem Term wurden der Mittelwerte herangezogen, da in dieser Überschlagsrechnung nur von stationären Verhältnissen ausgegangen werden konnte;
- Stichtagsmessung des Abflusses der Oberflächengewässer (April 1998)
- Grundwasserneubildung im Speisungsgebiet (langjähriges Mittel; Bilanzgröße aus dem Grundwassermodell)
- Unstrut-Verlauf im Ist-zustand

In Abbildung 4.3-19 sind die Stoffstromkomponenten mit ihren Nitratkonzentrationen und -frachten graphisch dargestellt, in Tabelle 4.3.3-1 sind die Rechengrößen noch einmal zusammengefaßt.



**Abb. 4.3-19: Stoffbilanzmodell Unstrutauae**

Tabelle 4.3-2: Rechengrößen des Stoffbilanzmodells

Bilanzglied / Stoffstrom	Q (m <sup>3</sup> /h)	C(NO <sub>3</sub> ) (mg/l)	F (kg/d)	Bemerkung
<b>Unstrut</b>				
Bollstedt	5.210	32,10	4.014	
Thamsbrück	7.825	31,45	5.905	
Differenz	<b>+ 2.615</b>		<b>+ 1.892</b>	Netto-Nitrataufnahme der Unstrut zwischen Bollstedt und Thamsbrück
<b>Nebenflüsse</b>				
	1.218		1.090	enthält unterirdischen Drainageanteil, der den Gräben zugeleitet wird
Suthbach:	649	35,00	545	
Welsbach:	100	42,70	102	
Nordmar:	80	47,00	90	
Altengottenscher Kanal	22	0,25	0,1	
Felchtaer-B.	261	40,00	250	
Orlbach/Sumbach	106	40,00	101	
<b>Restglieder:</b>				

Bilanzglied / Stoffstrom	Q (m <sup>3</sup> /h)	C(NO <sub>3</sub> ) (mg/l)	F (kg/d)	Bemerkung
Sickerwasser (direkt)		58,00	14	Fracht als Maximalwert von TP 2 übernommen
Grundzufluß (direkt)	1.397	23,48	<b>787</b>	aus der Bilanz errechneter grundwasserbürtiger Nitratzugang in die Unstrut
GWN (S)	120	275,70	794	wird als Fracht in der Unstrut nicht wirksam

Aus diesem Stoffbilanzmodell lassen sich die folgenden Schlußfolgerungen ziehen, die für die Bewertung der prognostischen Gewässerbeschaffenheit der Entwicklungsalternativen 4 bis 6 von Bedeutung sind.

Die **Netto-Nitrataufnahme** der Unstrut auf dem Abschnitt Bollstedt - Thamsbrück resultiert zu ca. 58 % aus **Zuflüssen der Nebenflüsse** einschließlich des Kanalsystems in den Riedflächen. Den Hauptanteil machen darin jedoch die Nebenflüsse aus den Speisungsgebieten aus. Das wird aus den Konzentrationen und der Fracht des Altengotternschen Kanals deutlich, der mit 0,13 kg/d nur einen Bruchteil der Fracht in die Unstrut einträgt. Die Ursache liegt offenbar darin, dass der Altengotternsche Kanal durch sein Sohlniveau überwiegend reduziertes Grundwasser aufnimmt.

Die **unterirdische Direktdränage** wurde auf folgendem Wege geschätzt. Im Teilprojekt 2 sind Nitratfrachten im Sickerwasser zwischen 0 und 23 kg/ha bei einer mittleren Nitratkonzentration im Sickerwasser von 58 mg/l ermittelt worden. Davon wurde ein mittlerer Wert von 12 kg/(ha·a) in die Rechnung einbezogen. Da der Anteil wirklich dränierter Fläche eine nicht bekannte Größe ist, wurde ein Randstreifen entlang der Unstrut angenommen, der direkt in die Unstrut dräniert wird. Die Breite des Randstreifens wurde mit der Hälfte der Entfernung zum nächsten, parallel zur Unstrut verlaufenden Graben angenommen. Dem liegt die Überlegung zugrunde, dass die Dränagen auf kürzestem Wege dem nächsten Vorfluter zugeleitet werden. Daraus ergab sich eine Fläche von 427 ha angenommener, direkt in die Unstrut dränierter Fläche. Legt man auf diese Fläche die oben angegebene mittlere Stofffracht von 12 kg/(ha·a), ergeben sich 14 kg/d an Gesamtfracht Nitrat, die der Unstrut über diesen Dränageanteil direkt zugehen könnten. Dass die tatsächlichen Konzentrationen in der Dränage geringer sein können als die im Sickerwasser ermittelten 58 mg/l, zeigt eine Beprobung der Dränage bei Thamsbrück, die 17 mg/l NO<sub>3</sub> erbrachte. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Dränage immer auch Anteile des (reduzierten) Grundwassers aufnimmt. Damit ergibt sich aus einem Bilanz-Überschlag nach der Formel:

$$F_U = F_N + F_{Dd} + F_{GW}$$

$F_U$  ... Netto-Nitrataufnahme der Unstrut

$F_N$  ... Fracht der Nebenflüsse

$F_{Dd}$  ... Anteil der Direktdränage

$F_{GW}$  ... grundwasserbürtige Fracht

eine errechnet **grundwasserbürtige Nitratfracht** von 787 kg/d. Dem entspricht bei einem direkten Grundzufluß in Unstrut von 1.397 m<sup>3</sup>/d eine Nitratkonzentration von 23,5 mg/l.

Dieser Wert liegt in der Größenordnung der mittleren Konzentration in der Meßstelle Agt 1/97o (Pleistozän) von 32,7 mg/l.

Der direkte Grundzufluß erklärt sich aus dem tiefen Einschnitt der Unstrut in die Talsedimente, der zwischen Altengottern und Thamsbrück bis auf 168 m NN hinabreicht und damit die pleistozänen Sedimente anschneidet (s. Kap. 4.1).

Die Unstrut erhält somit auf ihrem Wege von Bollstedt nach Thamsbrück über den direkten Grundwasserzufluß ca. 47 % ihrer Nitratfracht. Da dieses Grundwasser jedoch stark reduzierte Anteile enthält, kommt es insgesamt zu einer Konzentrationsabnahme in der Unstrut zwischen Bollstedt und Thamsbrück.

Damit wird auch auf diesem Wege belegt, welcher Bedeutung einer Verminderung der Einträge in den Speisungsgebieten zukommt. Diese sind für die Grundwässer in der Aue maßgeblich und wirken sich auf die Beschaffenheit des Oberflächengewässers aus, wenn dies den Talgrundwasserleiter in einer Tiefe anschneidet, wo reduktive Prozesse noch nicht abgelaufen sind. Eine Anhebung der Gewässersohle trägt dazu bei, den Reaktions-Weg für die Reduktion des Grundwassers an der Basis der Auensedimente zu erhöhen und führt damit insgesamt zur Verringerung der grundwasserbürtigen Nitratfracht.

## 4.4 Stoffumwandlungsprozesse

Im Labormaßstab wurde die Denitrifikation an tonig-schluffigem Sediment und am humosen Substrat des Torfes untersucht. Es wurden drei Batch-Versuche durchgeführt (s. Kap. 3.3.4), die insgesamt reproduzierbare Ergebnisse lieferten.

Ziel der Batch-Versuche war die Ermittlung einer Abbaurate für Nitrat im Auensediment der Unstrutae bei Altengottern. Außerdem wurden auf Grund der geologischen Verhältnisse die Versuche auch im Hinblick auf einen möglichen Sulfatabbau durchgeführt.

### 4.4.1 Nitrat-Reduktion

In Abbildung 4.4-1 sind die Nitratganglinien der drei durchgeführten Batch-Versuche dargestellt.

Bei der Auswertung der Batch-Versuche sind zunächst **versuchsbedingte Unterschiede** festzustellen. Im Versuch 1 wurden die Batch-Flaschen nach der Probennahme jeweils wieder mit Grundwasser nachgefüllt, um das Sediment-Wasser-Verhältnis konstant zu halten. Die damit verbundene Nachlieferung von Nitrat zeigt sich in diesem Versuch durch längere Abbauzeiten. Die Wirkung des zugegebenen Reduktionsmittels führt im Versuch 1 zu einem schnelleren Abbau des Nitrats, unabhängig vom Substrat. In den Versuchen 2 und 3, in denen kein Grundwasser nach der Probennahme zugegeben wurde, ist der Nitratabbau lithologie-bestimmt. Hier wurde erwartungsgemäß in den Torf-Proben das Nitrat schneller abgebaut.

Der Versuch 3 zeigt gegenüber dem Versuch 2 eine andere Abbaucharakteristik. Auf Grund der Abnahmezeiten in Versuch 2 wurde im Versuch 3 bereits nach 2 Tagen das erste Mal beprobt, was zu der anderen Abbaucharakteristik führt. Es kann aber bei diesem Versuch auch eine Adaptionphase von 2 Tagen eingetreten sein, da als zusätzliche organische Kohlenstoffquelle Natrium-Azetat zugegeben wurde.

Die weitere Auswertung der Batch-Versuche hat die Ermittlung von Kinetik-Parametern zum Ziel, die Aufschluß darüber geben sollen, welche Abbaukinetik im Auensediment anzunehmen ist. Die Auswertung wurde für das Nitrat durch Regression der Abbaukurven vorgenommen (s. Kap. 2.3). Sie soll im folgenden anhand der Ergebnisse des Versuchs 3 erläutert werden. Der Versuch 3 wird herangezogen, weil in diesem eine dichte Probennahme in den ersten Tagen erfolgte. Auf Grund der angenommenen Adaptionphase werden bei den Ansätzen 10 und 12 (mit Natriumacetat) die Abbaukurven ab dem Tag 2 ausgewertet. Als versuchsbedingte Modifikation des naturnahen Zustandes wurde Reduktionsmittel zugegeben, daß das Redoxpotential im Reaktor niedrig halten und somit naturnähere Gegebenheiten gewährleisten sollte.

In Abbildung 4.4-2 sind die Abbaukurven des Nitrats und die Zunahme des Ammoniums der vier Flaschensätze des dritten Versuchs mit den zugehörigen Regressionskurven aufgetragen.



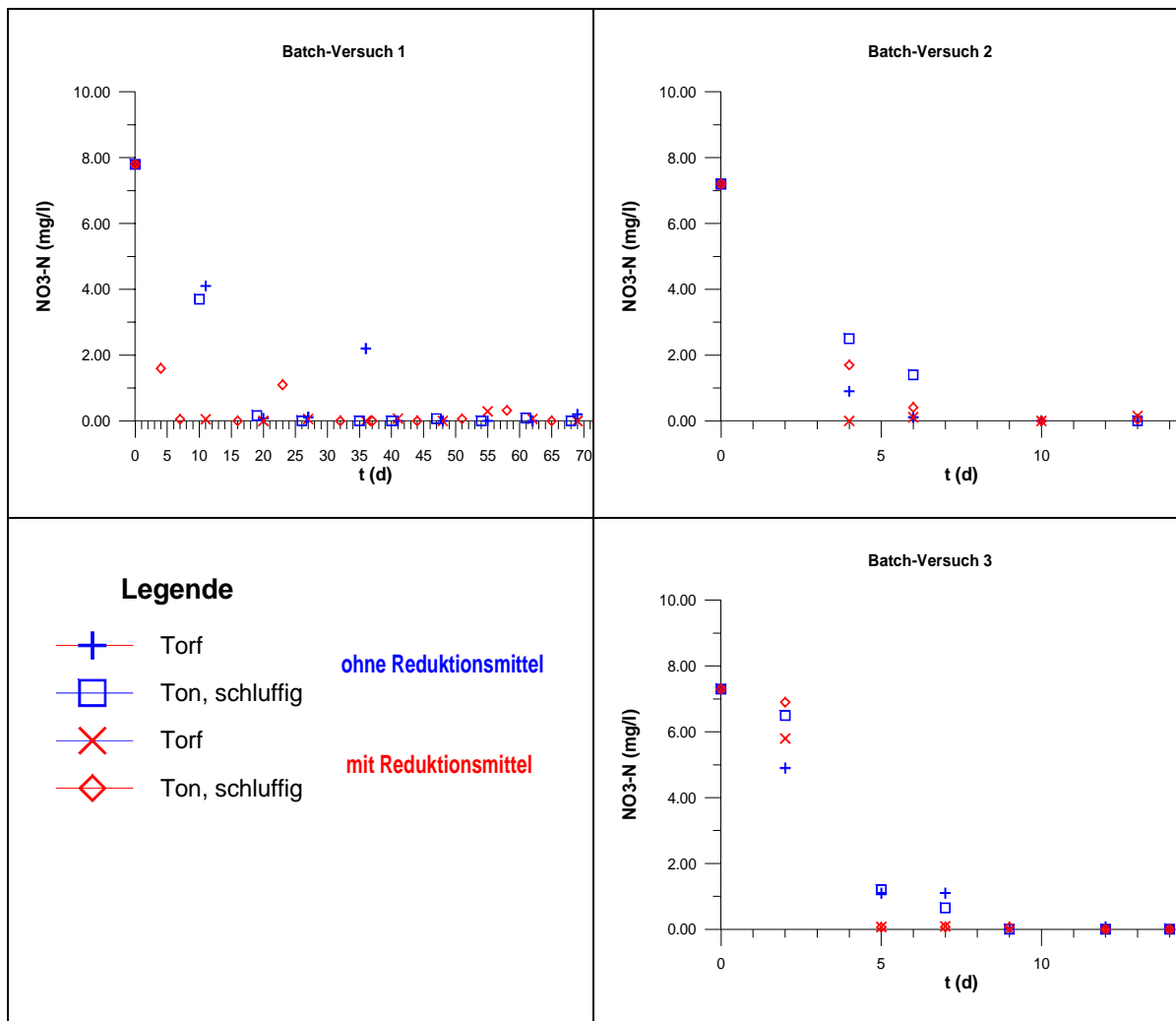


Abb. 4.4-1: Nitratganglinien der Batch-Versuche

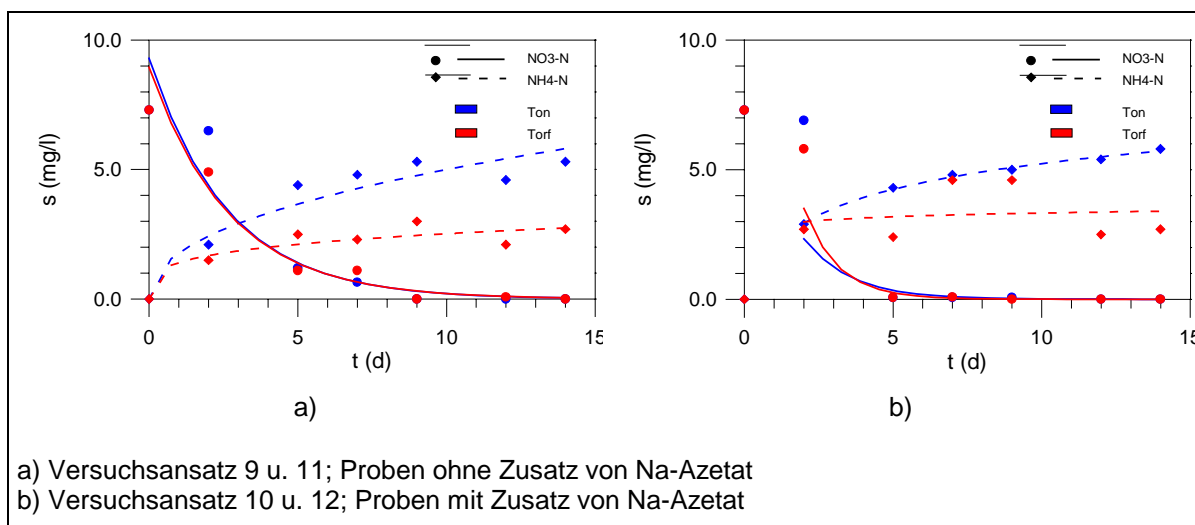


Abb. 4.4-2: Nitrat und Ammonium in Batch-Versuch 3

Aus dem Verlauf der Abbaukurven ließen sich die folgenden kinetischen Parameter ermitteln (s. Tab. 4.4-1).

Tabelle 4.4-1: Kinetische Parameter des Batch-Versuches 3

Versuchs- ansatz	Lithologie	Zugabe	Lagezeit (d)	k (1/d)	s <sub>0</sub> (mg/l)	R <sup>2</sup>
9	Torf	keine	0	-0,374	8,954	0,965
11	Ton	keine	0	-0,379	9,303	0,945
10	Torf	NaAz	2	-0,884	20,5	0,80
12	Ton	NaAz	2	-0,639	8,377	0,676

Beim Vergleich der Ansätze 9 + 11 mit 10 + 12 zeigt sich, daß der Abbau stärker von dem Angebot an mikrobiell nutzbarem Kohlenstoff abhängig ist als von den lithologischen Unterschieden zwischen Ton und Torf. Betrachtet man die Ansätze 9 und 11 als die naturnäheren (ohne künstliche Zugabe von Kohlenstoff) ergibt sich für beide Sedimente eine Abbaukonstante von  $k \approx 0,375$  1/d. Im natürlichen Zustand von Torf und Schluff ist der Anteil des mikrobiell verwertbaren Kohlenstoffs damit gleich.

In allen Batch-Versuchen zeigte sich mit der Abnahme des Nitrats eine gleichzeitige **Zunahme des Ammonium-Stickstoffs** (s. Abb. 4.4-2). Damit ist ein Hinweis gegeben, daß es in den Sedimenten zur Ammonifizierung kommen kann. Da die Ammoniumzunahme bereits während des Prozesses der Nitratreduktion beginnt, muß hier auch von einem nicht quantifizierbaren Anteil an desorbiertem Ammonium ausgegangen werden. Dies wird auch daraus geschlossen, daß bei nahezu gleichen Nitratrückgeängen in den Tonproben etwa das Doppelte an Ammonium-Stickstoff gefunden wurde.

Ein nicht zu vernachlässigender Teil an Ammonium kann aber auch auf die Ammonifizierung geogener Biomasse zurückzuführen sein. Aus Untersuchungen an Braunkohlensedimenten ist bekannt, daß auch hier unerwartet hohe Ammoniumzuwächse bei der Nitratreduktion aufgetreten sind, die nicht allein auf den reduzierten Anteil des Nitrats zurückzuführen sind. Gestützt wird diese Annahme auch von den Ergebnissen des TP 2, wo in den Sedimenten mit hohem Kohlenstoffanteil größere Mengen an Ammonium gefunden wurden und die Ammoniumgehalte in den Sickerwasserproben nach der Teufe hin ständig zunehmen.

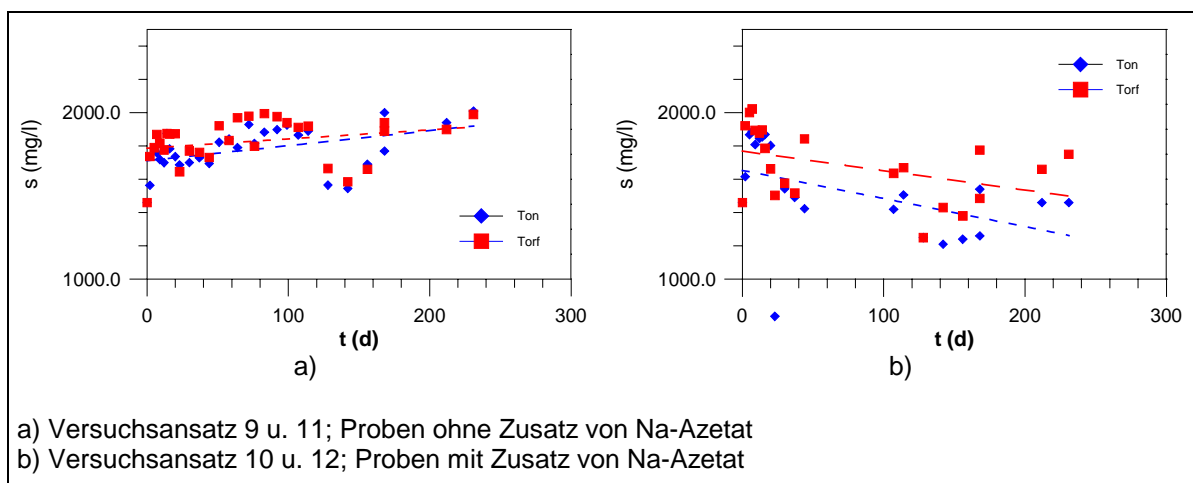
#### 4.4.2 Sulfat-Reduktion

Auf Grund der Ergebnisse der Beprobungen der Grundwassersammler, in denen immer auch Schwefelwasserstoff gefunden wurde, sind die Batch-Versuche im Hinblick auf eine mögliche Sulfatreduktion ausgewertet worden. Problematisch waren bei der Versuchsdurchführung zwei Faktoren:

- analysenbedingt konnte von den Proben kein H<sub>2</sub>S bestimmt werden, da hierfür die Probenmenge (25 ml) nicht ausreicht,

- die Sulfatreduktion konnte somit nur über die Sulfatgehalte im Batch-Ansatz beobachtet werden. Die Bildung von max. 68,4 mg/l an H<sub>2</sub>S, wie sie im Feld gemessen worden sind, benötigt bei vollständiger Bildung aus Sulfat stöchiometrisch 193,1 mg/l an Sulfat. Die Sulfatgehalte im Wasser von meist über 1.500 mg/l erschweren somit die Interpretation der Analyseergebnisse aufgrund analysebedingter Fehler bei der Sulfatbestimmung von bis zu 10% (hervorgerufen durch notwendige Verdünnungen - Angabe des Labors).

In Abbildung 4.4-3 sind die gleichen Versuchansätze wie in Abbildung 4.4-2 dargestellt.



**Abb. 4.4-3: Sulfat in Batch-Versuch 3**

Auch bei der Entwicklung der Sulfatgehalte ist zu erkennen, daß das Verhalten vom Angebot an mikrobiell verwertbarem Kohlenstoff bestimmt ist. Während die Proben mit Azetat-Zusatz eine abnehmende Sulfat-Tendenz zeigen, ist bei den Proben ohne zusätzliche Kohlenstoffquelle eine leicht zunehmende Sulfat-Tendenz zu erkennen. Hinsichtlich des Vergleichs zwischen den Lithologien wird deutlich, daß sich in den Tonproben geringere Sulfatgehalte einstellen als in den Torfproben. Da es sich bei dem Ton letztendlich um fluviatil umgesetztes Keupermaterial handelt und das Tonsediment somit selbst residuales Sulfat enthält, kann sich in dem Ton bereits eine sulfatreduzierende Population ausgebildet haben, die zu einem stärkeren Sulfatabbau im Ton führt.

Die biologischen Untersuchungen des Bodens bestätigen diese Annahme. In Tabelle 4.4-2 sind die Ergebnisse zur Untersuchung auf Desulfurikanten in vier verschiedenen Lithologien aus dem Säulenversuch dargestellt. Hier zeigte sich, daß vor allem in dem Ton über dem Torf die meisten Desulfurikanten enthalten sind.

Tabelle 4.4-2: Desulfurikanten im Auensediment

Lithologie	Desulfurikanten (MPN/gTS)
Kies, schluffig	2,8E+07
Ton, schluffig	5,7E+06
Ton, schluffig	3,9E+07
Torf	1,8E+07

In dem durchgeführten *Säulenversuch* sollte das Raum-Zeit-Verhalten des Stoffabbaus untersucht werden. In Abbildung 4.4-4 sind die Nitrat- und Sulfatkurven der sechs Probennahmeports gegenübergestellt.

Bei allen drei Wasserproben zeigt sich ein Nitratrückgang über das gesamte Profil. Auch die Wasserprobe mit einem Input von 48 mg/l an NO<sub>3</sub>-N (entspricht 212,64 mgNO<sub>3</sub>/l) läßt über das gesamte Profil eine Nitratreduktion bis auf 27 mg/l an NO<sub>3</sub>-N (56 %) erkennen. Hierbei handelt es sich um Sickerwasser aus dem Lysimeter A4 (Keuperstandort) des Teilprojektes 2 (s.a. Kap. 3.3.5).

Tabelle 4.4-3: Denitrifikanten im Säulensubstrat

Lithologie	Port	Denitrifikanten (MPN/g TS)
Ton, (QH 3)	6	1800
Torf, (QH 2)	4, 5	970
Ton, schluffig (QH 1)	2, 3	140
Kies, schluffig (Pleistozän)	1	540

Die Menge der Denitrifikanten im oberen Ton (Port 6) macht den starken Nitratrückgang in der oberen Schicht erklärlich.

Die Sulfatreduktion konnte im Säulenversuch nicht nachvollzogen werden, da keine Redoxbedingungen eingestellt werden konnten, die eine Sulfatreduktion gestatten. Außerdem erbrachten die Batch-Versuche erkennbaren Sulfatabbau nur in den Proben, die im Unterschied zum Säulenversuch zusätzlich mit organischem Kohlenstoff dotiert wurden.

Anhand der Proben aus Port 6 ist erkennbar, daß in dem oberen Ton (QH 3) auch mit dem sulfatreichen Wasser aus dem Brunnen Hy Scs 38 die Sulfatgehalte im Wasser nahezu konstant auf einem Niveau zwischen 1.200 und 1.300 mg/l bleiben. Hier kann es sich auch um eine Rücklösung des Sulfats aus dem Boden handeln, das im Gelände durch Sulfatsalz-Böden sichtbar wird, die u.a. Gegenstand der Untersuchungen von Schulze (1980, 1992) waren.

Freiseite für

**Abb. 4.4-4: Nitrat und Sulfat im Säulenversuch**

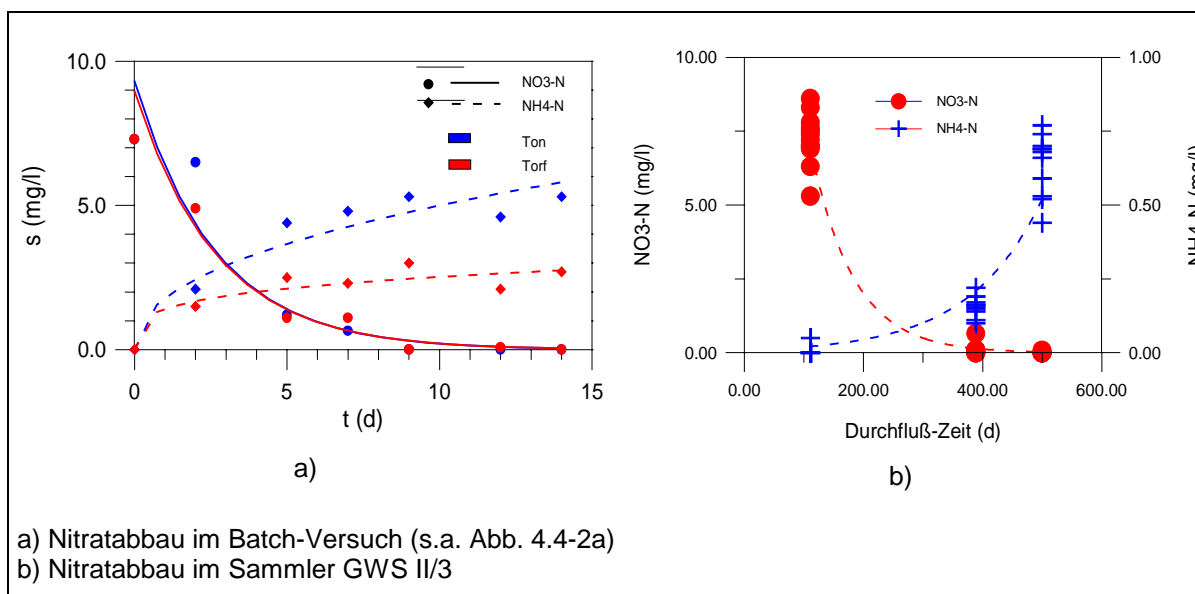
### 4.4.3 Übertragung der Ergebnisse auf das Feld

Bei der Übertragung dieser Ergebnisse auf den Feldmaßstab wird aufgrund der Strömungsverhältnisse des vertikalen Aufstiegs, mit einer Abstandsgeschwindigkeit von  $v_a = 0,009$  m/d gerechnet. Die Abstandsgeschwindigkeit ergibt sich aus:

$$v_a = \frac{k_f \cdot i}{n_e}$$

$v_a$	Abstandsgeschwindigkeit
$k_f$	vertikaler Durchlässigkeitsbeiwert ( $5 \cdot 10^{-7}$ m/s)
$i$	Gefälle (0,01)
$n_e$	nutzbare Porosität (0,05)

Die Übertragung der Laborergebnisse auf das Feld kann anhand der Ergebnisse am Grundwassersammler GWS II/3 vorgenommen werden (s. Abb. 4.4-5).



**Abb. 4.4-5: Vergleich der Ergebnisse Batch-Versuch und Feld**

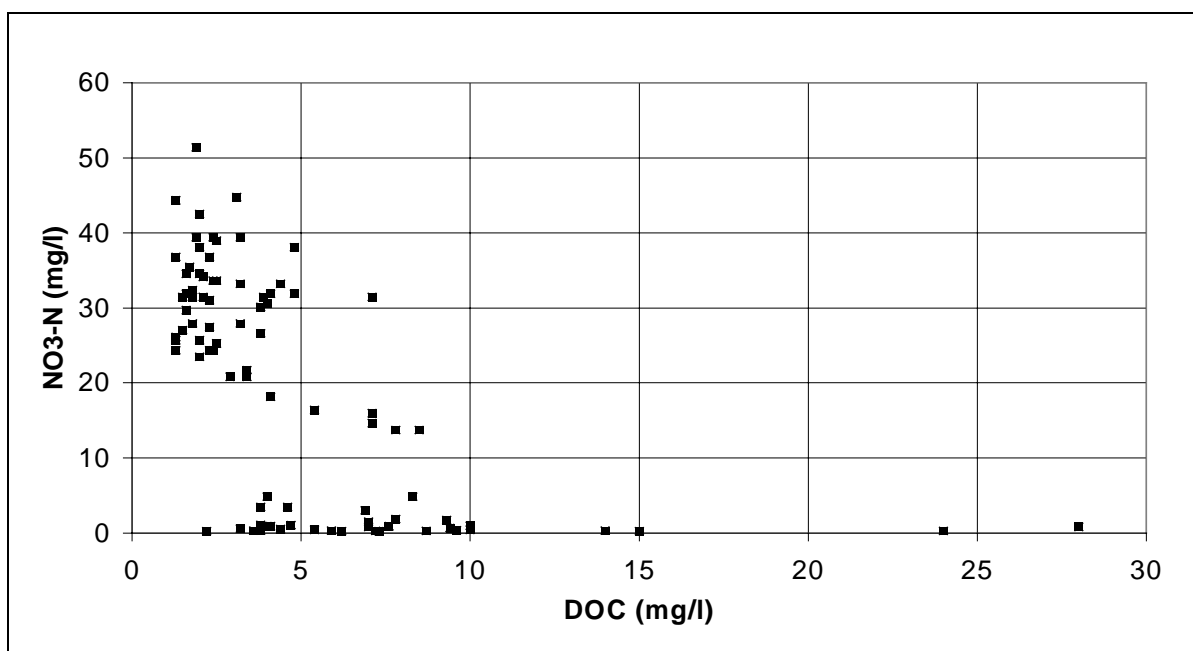
Dabei sind die Messungen am Grundwassersammler fließzeitbezogen bei einer Profilhöhe von 7 m aufgetragen. Den Sammlerteufen wurde somit jeweils eine Fließzeit zugeordnet. Da es sich um einen äußerst langsamen Durchfluß handelt, wurden stationäre Verhältnisse angenommen.

Beim Nitrat zeigt sich eine analoge Abbaukinetik (1. Ordnung) wie bei den Batchversuchen. Jedoch ergibt sich aus diesen Meßwerten eine Abbaukonstante von  $k = -0,014$  1/d, die damit nur 1/20 der Abbaukonstante aus dem Batch-Versuch beträgt.

Beim Ammonium-Zuwachs ergab sich im Feld gar eine exponentielle Zunahme gegenüber einer logarithmischen Zunahme im Batch-Versuch. Dies ist ein weiterer Hinweis auf eine Ammonifizierung organischer Substanz. Offensichtlich kommt es in dem Teufenbereich 2 - 3 m zu einem Ammoniumpeak, der geogene Ursachen hat und durch Nitratreduktion allenfalls verstärkt wird.

Eine weitere Ursache für die Abweichungen in der Kinetik des Stoffabbaus zwischen Feld und Labor kann die Übersättigung des Sedimentes mit Wasser im Batch-Versuch sein. Weiterhin zeigt dieser Vergleich, daß es hier bereits zu Problemen des Skalenüberganges zwischen der Skale des Labors und der Skale eines ca. 10 m mächtigen Sedimentpaketes kommen kann.

Die Verfügbarkeit mikrobiell verwertbaren Kohlenstoffs zeigte sich auch bei den Felduntersuchungen als ein bestimmender Faktor für die Nitratreduktion. Aus der Korrelation zwischen Nitrat und DOC in den Proben der Grundwassersammler (s. Abb. 4.4-6) geht dieser Zusammenhang hervor.



**Abb. 4.4-6: Korrelation DOC / NO<sub>3</sub> in Grundwassersammlerproben**

Die räumliche Verteilung des DOC zeigt, verglichen mit Abbildung 4.3-9, die Zusammenhänge zwischen DOC und NO<sub>3</sub>-N im Profil der Auensedimente des Altgotternschen Rieds (Abb. 4.4-7). Insgesamt wird bei der Übertragung der Untersuchungsergebnisse auf den Feldmaßstab deutlich, daß es bereits in den unteren Metern des Profils der bindigen Auensedimente zum Abbau des aus dem Liegenden aufsteigenden Nitrats kommt.

Die Sulfatreduktion konnte im Feld am Vorhandensein von H<sub>2</sub>S besser beobachtet werden als im Labor, wenngleich die Abnahme des Sulfats mit zunehmender Profilhöhe auch im Feld nicht signifikant war (s. Abb. 4.4-8), was auf die oben beschriebenen stöchiometrischen Verhältnisse zurückzuführen ist. Außerdem ist, wie der Säulenversuch zeigt, mit einer Rücklösung von Sulfat in den oberen Sedimentbereichen zu rechnen, der jedoch auf Grund der generell hohen Sulfatgehalte im Grundwasser meßtechnisch nicht erfaßt werden kann. Daß auch dieser Prozeß abhängig von der Verfügbarkeit mikrobiell nutzbaren Kohlenstoffs ist, zeigt die Gegenüberstellung mit den DOC-Gehalten im Profil in Abbildung 4.4-8.

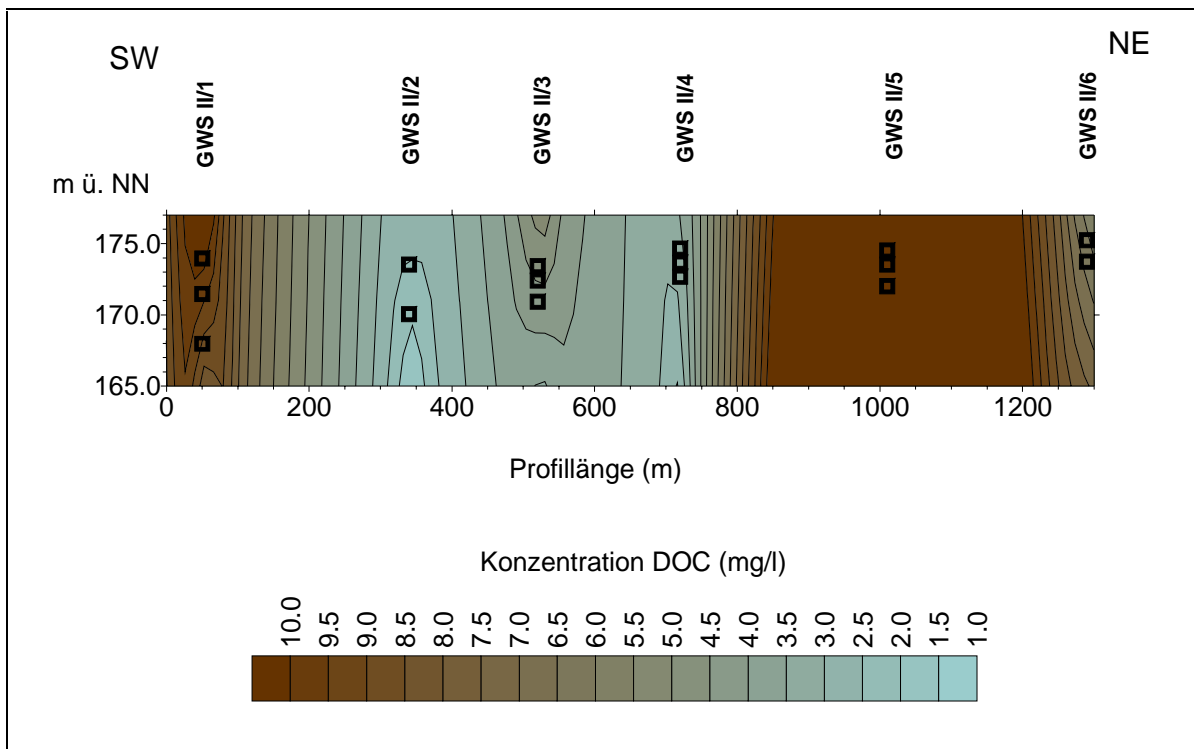


Abb. 4.4-7: DOC im Auensediment des Altengotternschen Rieds

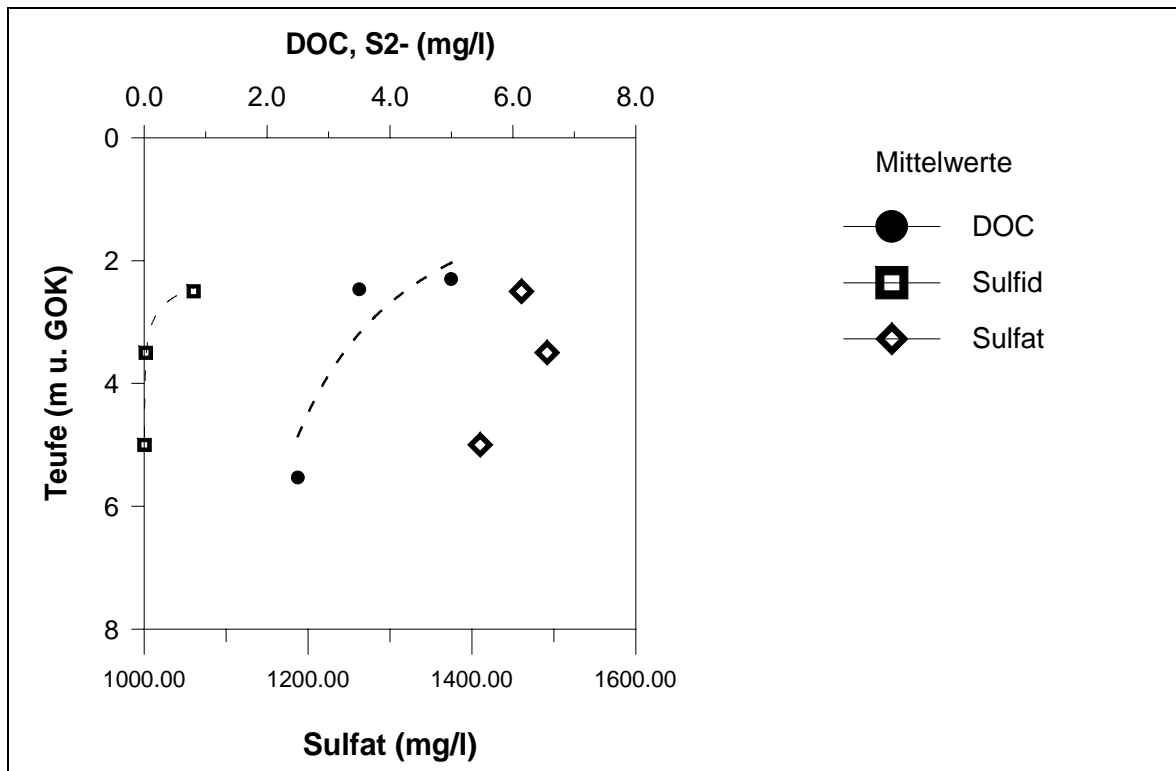


Abb. 4.4-8: Sulfatreduktion in Grundwassersammler II/3



## **4.5 Zwischenzusammenfassung der Untersuchungsergebnisse**

### ***Grundwasserdynamik***

Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Grundwasserdynamik lassen sich wie folgt zusammenfassen.

Im Hauptuntersuchungsgebiet sind die verkarsteten Partien des unteren Gipskeupers der maßgebliche Pfad für den Zufluß aus den Speisungsgebieten in das Entlastungsgebiet. Mittels Ganglinienvergleich konnte der Hauptzufluß vom Westen und Nordwesten in das Großengottersche und Altengottersche Ried lokalisiert werden. Im Südwesten des Untersuchungsgebietes machen sich die lokalen Vorfluter stärker bemerkbar. Die Druckspiegelverhältnisse in der Aue werden maßgeblich von den Druckpiegelhöhen des Keupers bestimmt. Die Grundwasserneubildung in Aue und Speisungsgebieten ist für die Grundwasserstände in der Aue mit bestimmend. Die Unstrut-Wasserstände üben, wo das Unstrut-Bett im Auelehm verläuft, demgegenüber eine geringere Wirkung aus.

Die Ergebnisse aus dem Gebiet Sömmerda zeigen, daß es zu einer stärkeren Interaktion zwischen Fluß und Auengrundwasser in den Bereichen kommt, wo die Unstrut nicht in einer Auelehmschicht verläuft. Dies ist bei jeder Revitalisierungsmaßnahme zu beachten.

Die Messungen im Projektzeitraum lagen im Hauptuntersuchungsgebiet ca. 40 cm unter dem langjährigen Mittelwert der Grundwasserstände. Aus der Modellierung ergibt sich für den Ist-Zustand, daß ein HQ<sub>100</sub> auf Grund der Kürze der Hochwasserwelle zu keiner signifikanten Erhöhung der Grundwasserstände in der Aue führt. Im Hinblick auf die Einwirkung der Unstrut-Dynamik auf die Grundwasserstände in der Aue sind die Entwicklungsalternativen 2 und 3 durch den kanalisierten und damit "starren" Verlauf der Unstrut nicht relevant. Nur durch Rückbau von meliorativen Elementen in der Aue kann die Dynamik der Grundwasserflurabstände zu den naturschutzfachlich gewünschten Vernässungseffekten und damit zu einem für Vernässungsstandorte optimalen Bodenfeuchteregime führen. Maßnahmen wie der Anstau des "Nebenkanals 1.1" (EA 3) können dafür zielführend sein. Die Berechnungsergebnisse zu EA 4 weisen aus, daß eine abstromige Anbindung der Unstrut-Altarme weiterhin zu deren entwässernder Wirkung führen und somit keine signifikante Anhebung der Grundwasserstände erreicht werden kann. Die Berechnungsergebnisse eines HQ<sub>100</sub>-Hochwassers ergeben signifikante Anhebungen der Grundwasserstände sowohl im Altengotterschen als auch im Großengotterschen Ried. Die Entwicklungsalternativen 5 und 6 ergeben analoge Berechnungsergebnisse zur EA 4.

### ***Grundwasserbeschaffenheit***

Die geogenen Beschaffenheitsverhältnisse widerspiegeln das geologische Umfeld der grundwasserleitenden Schichten. Im Zentrum der Langensalza-Mühlhäuser Mulde wird der HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>-Einfluß des Muschelkalk-Grundwassers durch die ihm überlagernden Keuperschichten gedämpft. Dies dokumentiert sich an dem Meßwertpool mit SO<sub>4</sub>-Dominanz. Hier herrscht der Ca-SO<sub>4</sub>-Typ des Grundwassers vor. Im Untersuchungsgebiet Sömmerda sind die geogenen Einflüsse durch hohe Sulfat und Chlorid-Werte im Auen-Grundwasser erkennbar und konnten auch durch Leitfähigkeitsmessungen in Oberflächengewässern lokalisiert werden.

Bei den anthropogenen Stoffen zeigte sich, daß das Grundwasser in den Speisungsgebieten deutlich höhere *Nitrat*gehalte aufweist als in den Entlastungsgebieten. Der Hauptzufluß der Stoffe gelangt aus dem Westteil des Hauptuntersuchungsgebietes in die Aue.

Im Untersuchungsgebiet Sömmerda zeigt sich ein analoges Bild, was die Verhältnisse zwischen Speisungs- und Entlastungsgebieten betrifft. Die höchsten Nitratgehalte wurden in Grundwässern der Speisungsgebiete gefunden.

Wird dieses Grundwasser bereits am Übergang zur Niederterrasse entlastet und tritt dort zutage, dann können die Nitratfrachten über die Passage der Gräben und sonstigen Vorfluter der Unstrut zugeleitet werden und erfahren einen Abbau erst im Oberflächengewässer. Erst in der längeren Passage des Talgrundwasserleiters kommt es zum Abbau des Nitrats. Wird dieses im Innern der Talaue durch Gräben aufgenommen, zeigen diese Gräben geringere Nitratgehalte. Jede Entwicklungsalternative, die die Einträge auf den Speisungsflächen unberücksichtigt läßt, vermag wesentliche Stoffausträge in das Auengrundwasser nicht zu mindern. Somit kann nur das Reduktionspotential der Auensedimente selbst für die Minderung der Stofffracht genutzt werden.

### *Stoffwandlungsprozesse*

In allen Batch-Versuchen zeigte sich mit der Abnahme des Nitrats eine gleichzeitige Zunahme des Ammonium-Stickstoffs. Damit ist ein Hinweis gegeben, daß es in den Sedimenten zur Ammonifizierung kommen kann. Ein nicht zu vernachlässigender Teil an Ammonium kann aber auch auf die Ammonifizierung geogener Biomasse zurückzuführen sein. Aus Untersuchungen an Braunkohlensedimenten ist bekannt, daß auch hier unerwartet hohe Ammoniumzuwächse bei der Nitratreduktion aufgetreten sind, die nicht allein auf den reduzierten Anteil des Nitrats zurückzuführen sind. Gestützt wird diese Annahme von den Ergebnissen des TP 2, wo in den Sedimenten mit hohem Kohlenstoffanteil ebenfalls größere Mengen an Ammonium gefunden wurden und die Ammoniumgehalte in den Sickerwasserproben nach der Teufe hin ständig zunehmen. Im Feld wurden sulfat-reduzierende Verhältnisse im Auensediment beobachtet. Auch die Reduktion von Sulfat, so haben die Laboruntersuchungen erbracht, ist vom Angebot an mikrobiell verwertbarem Kohlenstoff bestimmt.

## **5 Bewertung der Entwicklungsalternativen und Übertragung auf den Unstrutraum**

### **5.1 Darstellung der Entwicklungsalternativen**

In diesem Abschnitt werden die Entwicklungsalternativen (EA) 1 - 6 hinsichtlich ihrer auf die Grundwasserdynamik wirkenden Faktoren beschrieben. Zur Methodik der Herleitung der Entwicklungsalternativen sowie zur eingehenden Beschreibung der EA 4 - 6 wird auf den Bericht TP 7 verwiesen. Eine eingehende Beschreibung der EA 1 - 3 findet sich im Abschlußbericht des Teilprojektes 4.

#### **5.1.1 Entwicklungsalternativen 1 und 2**

Die Entwicklungsalternative 2 unterscheidet sich im Hinblick auf den Verlauf der Unstrut und der Gräben im Altengotternschen und Großengotternschen Ried nicht von der Ist-Situation (Entwicklungsalternative 1). Die Unstrut verläuft von Bollstedt bis Thamsbrück in ihrem künstlichen Bett und erfährt durch die Wehre Ringmühle, Altengottern und Thamsbrück künstliche Wasserspiegelaufhöhungen. Diese sind in das Modell mit folgenden Beträgen (Differenzen zwischen Ober- und Unterwasser) eingegangen (Eigenmessungen):

Ringmühle: 2,40 m,  
Altengottern: 1,80 m,  
Thamsbrück: 1,65 m.

Die Sohlhöhen der Unstrut liegen auf dem Abschnitt Altengottern - Thamsbrück zwischen 170 m NN und 168 m NN und auf dem Abschnitt Bollstedt - Altengottern zwischen 182 m NN und 170 m NN.

Die Unstrut ist beidseitig vollständig eingedeicht. Die Deichhöhen sind so bemessen, daß sie bis zum Wehr Thamsbrück ein HQ<sub>100</sub> und darunter ein HQ<sub>50</sub> schadlos abführen können. Somit fehlt die auentypische Überflutungsdynamik. Bei den Deichhinterländern handelt es sich nicht um Auen i.S. der Definition als "räumlich jene Talzonen, die innerhalb des Einflußbereiches von Hochwasser liegen" (GEPP 1986).

Das Meliorationssystem ist in dieser Variante entsprechend dem gegenwärtigen Zustand funktionsfähig. Es besteht aus Gräben und Rohrdränagen. Da keine für die Modellierungsarbeiten hinreichend genauen Angaben zu unterirdischen Rohrdränagen vorlagen, wurden im Modell für den Bereich des Großengotternschen Riedes die Sohdurchlässigkeiten der Gräben um 50 % erhöht (indem der Kolmationsfaktor um 50% verringert wurde), um die Wirkung der Dränagen im Modell abbilden zu können.

### 5.1.2      **Entwicklungsalternative 3**

Die Entwicklungsalternative 3 unterscheidet sich vor allem im Hinblick auf die meliorativen Maßnahmen von den Entwicklungsalternativen 1 und 2. Aufgrund der Ergebnisse des TP 3, das den Grundwasserflurabstand als einen abiotischen Hauptfaktor für die ökologische Entwicklung auennaher und auenähnlicher Landschaftsteile ausweist (MALT u. PERNER 1999), wurde eine Variante gesucht, lokal den Grundwasserstand im Bereich des Altengotternschen Rieds durch Einschränkung oder Rückbau meliorativer Maßnahmen anzuheben. Dies erfolgte unter den Annahmen der Landnutzung, der Schlagaufteilungen sowie des Gewässerverlaufes der Unstrut, die den Entwicklungsalternativen 1 und 2 entsprechen.

Für diese Entwicklungsalternative wurden zur Verbesserung geohydraulischer Verhältnisse in der Aue zwei Varianten gerechnet. Als eine zielführende Maßnahme (**Variante 3.1**) wurde der Einstau des nord-süd-verlaufenden Sammelgrabens (im Modell "Nebenkanal 1.1") im Altengotternschen Ried bis auf ein Niveau von 175,7 m ü. NN angenommen. Somit kann eine Ausspiegelung der Entwässerungsgräben im Altengotternschen Ried bis auf dieses Niveau erfolgen. Dies stellt eine Wasserspiegelerhöhung am Auslaufbauwerk in den Altengotternschen Kanal um ca. 1 m dar.

Bei der **Variante 3.2** wird der Altengotternsche Kanal unterhalb Altengottern in die Unstrut eingebunden, so daß er seine entwässernde Wirkung für das Altengotternsche Ried verliert. Zusätzlich wird der Welsbach zwischen Großwelsbach und der Einbindung in den Unstrut-Altarm bei Thamsbrück aus seinem jetzigen Bett herausgenommen und in Richtung Altengottern geführt, um dort direkt in die Unstrut einzubinden. Damit kann zusätzlich zu den Bewirtschaftungsformen des ANP 2 die Dynamik des Welsbachs als auentypisches Element innerhalb dieser Entwicklungsalternative wirken.

### 5.1.3      **Entwicklungsalternative 4**

Bei der konfliktgeminderten Entwicklungsalternative wurde von einem Unstrutverlauf ausgegangen, der in dem Abschnitt Bollstedt bis Altengottern dem Ist-Zustand entspricht. Nur zwischen der Einbindung des Felchtaer-Baches und der Ringmühle soll eine linksseitige Mäandrierung ermöglicht werden. Unterhalb von Altengottern erfährt die Unstrut eine Mäandrierung, um in Höhe des Thamsbrücker Wehrs in die bisherige Unstrut wieder einzubinden.

Die für diesen Fall anzunehmenden Gewässerspiegelhöhen der Unstrut, die als Randbedingungen in das Modell eingegangen sind, wurden für den Abschnitt Altengottern - Thamsbrück den Rechnungen von BCE (1998) entnommen. Für den Abschnitt Bollstedt - Altengottern wurden die Unstruthöhen aus dem Ist-zustand übernommen. Weitere Randbedingungen dieser Variante sind die Einschränkung von Entwässerungsgräben im Großengotternschen Ried auf kurze Abschnitte des Suthbaches sowie die Verkürzung des Karrenggrabens, der für den südlichen Zustrom in das Großengotternsche Ried eine wichtige entlastende Funktion inne hat. Auf der Seite des Altengotternschen Rieds sind lediglich der Altengotternsche Kanal und der "Nebenkanal 1.1" erhalten. Der Abschnitt der ehemals kanalisiertem Unstrut ist in Form von Altarmen ausgebildet, die am unteren Auslauf in die mäandrierende Unstrut über eine Sohlschwelle einbinden. Es wurde davon ausgegangen,

daß die mäandrierende Unstrut auf dem Niveau des Oberwassers des Wehres Thamsbrück einbindet.

Zu dieser Entwicklungsalternative wurde eine Variante gerechnet. Auf Grund des Modellierungsergebnisses zu den Grundwasserständen mit dem kanalisiertem Unstrutaltarm, ist als Variante 4.1 die kanalisierte Unstrut geländegleich aufgefüllt worden, so daß die hydraulische Wirkung dieses Abschnittes entfällt.

#### **5.1.4 Entwicklungsalternativen 5 und 6**

Die Entwicklungsalternativen 5 und 6 unterscheiden sich in ihren Planungen des Unstrutverlaufes nicht von einander. Der Unstrutverlauf ist zwischen Bollstedt und Thamsbrück als im Geländetiefsten nahezu vollständig mäandrierend vorgesehen. Die alten, kanalisierten Unstrutabschnitte sind als Altarme mit unterstromiger Anbindung an die mäandrierte Unstrut ausgebildet. Der Altengotternsche Kanal mit dem "Nebenkanal 1.1" im Altengotternschen Ried sowie der Gewässerverlauf des Suthbaches und der verkürzte Karrengraben im Großengotternschen Ried bleiben analog der Entwicklungsalternative 4 erhalten.

Infolge des vollmäandrierten Unstrutverlaufs, ohne die Wehranlagen Ringmühle und Altengottern mußte der Unstrut ein durchgehender Niveauausgleich von Bollstedt bis Thamsbrück aufgeprägt werden. Dies hat zur Folge, daß vor allem zwischen Altengottern und Thamsbrück der Unstrutwasserspiegel ein um bis zu 1,30 m höheres Niveau aufweist als in der Entwicklungsalternative 4.

### **5.2 Kriterien der Bewertung**

Aus Sicht der Grundwasserdynamik und Grundwasserbeschaffenheit wurden zur Bewertung der Entwicklungsalternativen Kriterien aufgestellt, die sich an den Zielen und Grundsätzen einer naturnahen Auengestaltung orientieren, wie sie von BINDER u. WAGNER (1994) genannt worden sind:

- Auen müssen in ihrer Gestaltung den regionalen Zusammenhängen zwischen Speisungsgebieten (recharge area) und Entlastungsgebieten (discharge area) Rechnung tragen,
- die Gewässersysteme in der Aue sollen eine natürliche Entlastung des regionalen Grundwasserstromes, der von den Speisungsgebieten ausgeht, ermöglichen,
- landschaftstypische Eigenschaften der Oberflächengewässer in der Aue sollen gewährleistet sein,
- die Oberflächengewässer in der Aue sollen eine vielfältige Gewässerlandschaft gestalten können.

Damit wird als ein wesentliches Element für die ökologische Beschreibung einer Aue deren Entlastungsfunktion für den regionalen Grundwasserstrom berücksichtigt.

In Tabelle 5.2-1 sind die daraus entwickelten Kriterien zusammengefaßt:

Tabelle 5.2-1: Kriterien für die Bewertung der Entwicklungsalternativen aus Sicht der Grundwasserdynamik und -beschaffenheit

Bewertung	Kriterium	Begründung
<b>Grundwasserströmung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Druckspiegelhöhen des Grundwassers</li> <li>• Wirkung von Dränagen</li> <li>• Druckentlastung durch pflanzlichen Wasserentzug</li> <li>• Grundwasserneubildung</li> </ul>	<p>Grundwasserflurabstand ist abotischer Hauptfaktor</p> <p>Meliorative Maßnahmen nehmen Einfluß auf Gundwasserflurabstände in der Aue</p> <p>Pflanzlicher Wasserentzug hat Einfluß auf die Druckspiegelhöhen des Grundwassers in den Entlastungsgebieten</p> <p>Grundwasserneubildung ist abhängig vom Grundwasserflurabstand und dem pflanzlichen Wasserentzug</p>
<b>Grundwasserbeschaffenheit</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• nutzungsbedingte Eintragspotentiale in das Grundwasser in Speisungs- und Entlastungsgebieten</li> <li>• Abbaupotential in der Aue</li> <li>• Auswirkungen auf Beschaffenheit von Oberflächengewässern</li> <li>• Sohlentiefe der Gewässer</li> </ul>	<p>Veränderte Nutzungen werden zu veränderten Stoffeinträgen führen.</p> <p>Das Abbaupotential ist vom Wege der Durchströmung abhängig</p> <p>Ziel von Revitalisierungsmaßnahmen ist die Verringerung von Stofffrachten im Oberflächengewässer</p> <p>Zufluß von belastetem Grundwasser ist abhängig von der Sohlentiefe der Gewässer</p>

### 5.3 Diskussion der Ergebnisse - Bewertung der Entwicklungsalternativen

#### 5.3.1 Entwicklungsalternativen 1 - 3

##### a) Grundwasserdynamik

Die Druckspiegelhöhen in der Aue werden sowohl von dem basalen Druck des Grundwassers im unverkarsteten Keuperhorizont als auch von der Grundwasserneubildungsdynamik in der Aue beeinflusst.

Die Grundwasserganglinie des Keupers ist ein nicht zu beeinflussender Faktor. Damit bleibt die Grundwasserneubildungsdynamik in der Aue als Steuergröße für den Wasserhaushalt in der Aue. Diese kann über die Bewirtschaftung beeinflusst werden. Wie in Teilprojekt 2 ausgeführt, führen Ackerstandorte zu einer größeren Bodenwasserausschöpfung und zu einem längeren Bodenfeuchtedefizit als extensives Grünland. Dieses Bodenfeuchtedefizit kann unter natürlichen Auenbedingungen durch den weit bis an die Geländeoberfläche heranreichenden Aufstieg des Grundwassers

ausgeglichen werden. Da in den Entwicklungsalternativen 1 bis 3 jedoch die Dränage erhalten bleiben soll, um eine ganzjährige Bewirtschaftung zu erhalten, wird der Grundwasseraufstieg gebrochen. Die Bodenfeuchteausschöpfung wird bei niedrigen Grundwasserständen allein aus dem Niederschlag gespeist, woraus wiederum niedrige Grundwasserneubildungsraten resultieren.

Die Beibehaltung der Dränage ist ebenso ein indirekter Zugriff auf die Wirkung der Keuperwasserstände. Bei funktionierender Rohrdränage und durch die Entwässerungsgräben wird der aufwärtsgerichtete Grundwasserfluß im Boden gebrochen. Die Dynamik der Keuperwasserstände kann sich somit nicht mehr bis an die oberflächennahen Bereiche durchpausen. Die Entwicklungsalternativen 1 und 2 sind vor diesem Hintergrund als nicht zielführend im Hinblick auf den Grundwasserhaushalt in der Aue zu bewerten.

In der Entwicklungsalternative 3 wird mit der Abtrennung des Nebenkanals "1.1" und der daran angeschlossenen Gräben diesem Sachverhalt Rechnung getragen. Indem der Nebenkanal "1.1" seine entwässernde Wirkung bis zu einem Wasserstand 175,7 m ü. NN verliert, kann der vertikal aufwärts gerichtete Grundwasserfluß bis auf dieses Niveau ansteigen, was sich auf den Bodenwasserhaushalt positiv auswirken wird.

(Zur Differenzierung des Bodenwasserhaushaltes verschiedener Böden s. Abschlußbericht TP 2).

Die Unstrut selbst wird als entlastendes Element mit ihren Sohllagen beibehalten und trägt somit auch zur Brechung des vertikal aufsteigenden Grundwasserstromes bei.

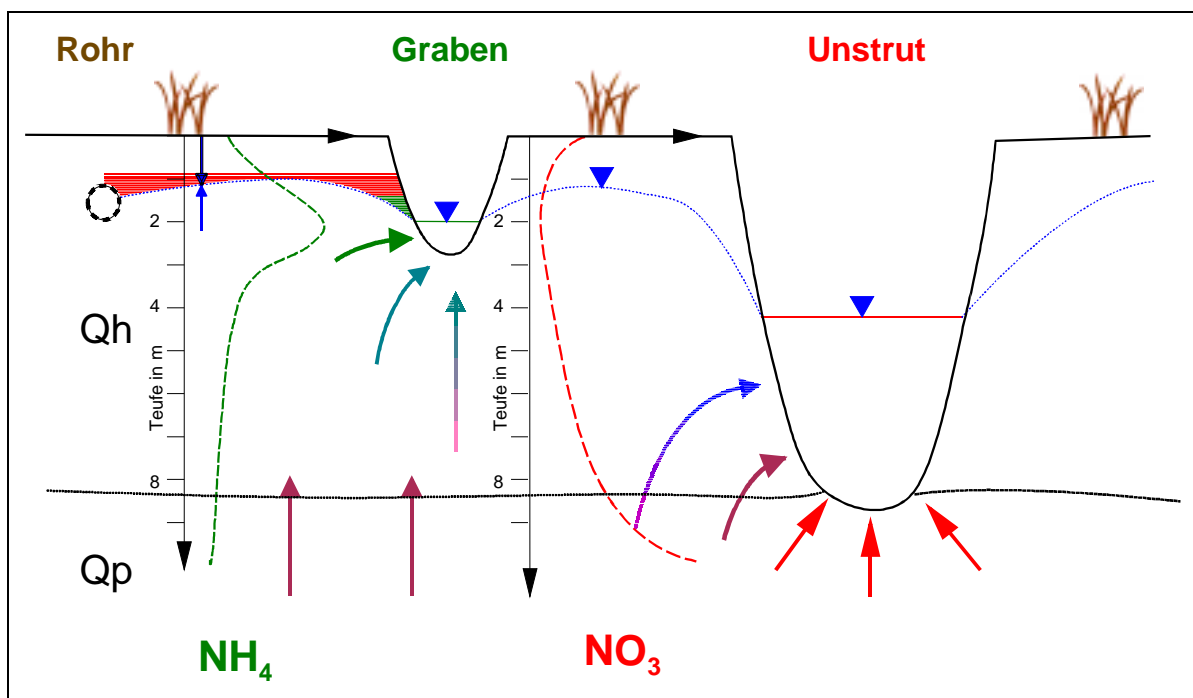
Hinsichtlich der Wirkung von Hochwasserereignissen tragen die Entwicklungsalternativen 1 - 3 im Untersuchungsgebiet zwischen Bollstedt und Thamsbrück nicht zu einer Anhebung der Grundwasserstände bei, da die Unstrut innerhalb der Deiche abgeleitet wird und die Hochwasserereignisse demzufolge zwar hoch aber kurz sind, so daß, wie die Modellierungsergebnisse zeigen, unter den Bedingungen der mächtigen bindigen Schichten der Aue eine Wirkung in das Hinterland sich nicht entfalten kann.

### ***b) Beschaffenheit***

Die Grundwasserbeschaffenheit in der Aue wird, wie die Untersuchungen zeigten, von zwei Faktoren bestimmt, den bewirtschaftungsbedingten Einträgen und den Zuflüssen in die Aue aus den Speisungsgebieten. Die bewirtschaftungsbedingten Einträge werden durch den vertikal abwärtsgerichteten Grundwasserstrom, der durch Dränage verlängert wird, dem Grundwasser zugeführt. Die Stärke der Einträge und des Verlagerungspotentials unter verschiedenen Bewirtschaftungen ist Gegenstand der Untersuchungen des TP 2.

Der Stoffeintrag in die Auen durch den aufwärtsgerichteten Grundwasserstrom unterliegt Umwandlungsprozessen, die im Kapitel 4 eingehend beschrieben worden sind. Diese Umwandlungsprozesse laufen unabhängig von der Bewirtschaftung auf der Aue ab. Die Untersuchungen zum Abbauverhalten von Nitrat haben gezeigt, daß eine Anhebung des Grundwasserstandes um 50 cm nicht entscheidend zur Nitratreduktion in der Aue beiträgt.

Zwei Effekte der Dränage können entscheidenden Einfluß auf die Beschaffenheit vom Grundwasser und in der Folge vom Oberflächewasser haben, wie anhand Abb. 5.3-1 erläutert werden soll.



**Abb. 5.3-1: Beschaffenheitsbeeinflussung der Oberflächengewässer durch basalen Grundwasserzutritt**

Sowohl in den Laborversuchen als auch in den Felduntersuchungen der TP 1 und 2 hat sich gezeigt, daß es in einer Tiefe von 1,5 bis 2,5 m u. GOK zu einem Maximum an Ammonium-Stickstoff kommt, das durch Mineralisierung von geogen-biogenem Stickstoff erklärt wird (s. Ammonium-Kurve in Abb. 5.3-1). Bei einem entsprechendem Sauerstoffangebot kann dieses Ammonium zu Nitrat oxidieren (s. Kap. 4.4 und Abschlußbericht TP 2). Vor dem Hintergrund dieses Prozesses kommt den unterirdischen Dränagen mit ihrer grundwasserabsenkenden Funktion eine entscheidende Bedeutung zu, wenn sie den Grundwasserstand soweit absenken, daß dies zu einer Oxidation des offenbar geogen entstandenen Ammoniums zu Nitrat führt. Damit können die unterirdischen Dränagen geradezu kontraproduktiv zu dem Ziel der Nitratminderung in der Aue wirken. Dies muß überall dort angenommen werden, wo die Dränagen tiefer liegen als 0,8 ... 0,9 m. Im Raum Altengottern und Großengottern liegen die Dränagen jedoch nicht tiefer als 0,8 m.

Ein zweiter Effekt des Stofftransportes betrifft die Grabendränage. Die Gräben sind mit ihren Sohlen bis auf eine durchschnittliche Tiefe von 2 m u. GOK in das Gelände eingeschnitten. Damit schneiden die Gräben den Grundwasserstand in dem Bereich 1,5 - 2,0 m an und erreichen damit genau die Tiefen-Zone in der das Ammonium-Maximum festgestellt wurde. Daraus können die hohen Ammonium-Gehalte in den Oberflächengewässern erklärt werden, die dann der Unstrut zufließen. Dieser Effekt kann auch im Untersuchungsgebiet Sömmerda erkannt werden, dort zeigen die flachen Gräben ebenso höhere Ammoniumgehalte als die tieferen Vorfluter. Die Beibehaltung der Oberflächen- und Grabendränage in den Entwicklungsalternativen 1 - 3 mit ihren Sohlentiefen bis in 2 m und darunter hat somit nicht nur Auswirkungen auf den



Wasserhaushalt sondern entscheidend auch auf die Wasserbeschaffenheit hinsichtlich des Eintrages von Ammonium.

Für die kanalisierte Unstrut muß dies im Hinblick auf den Nitratreintrag ebenso geschlußfolgert werden (rechter Teil der Abb. 5.3-1). Bindet die Sohle in die stärker mit Nitrat belasteten Pleistozänhorizonte ein, wird der Unstrut auf dem Wege des direkten Grundwasserzutritts Nitrat zugeführt. Dies wird aus den Bilanzzahlen der Nitratfrachten im Hauptuntersuchungsgebiet deutlich (s. Kap. 4.3). Schneidet die Unstrut gar Keuperschichten (Schilfsandstein) an, wie dies südlich von Bollstedt der Fall ist, so wird dieses Phänomen noch verschärft, da die Schichten des Keupers die Transportwege des Nitrats von den Speisungsgebieten in die Aue darstellen.

Diese Fakten führen zu der Einschätzung, daß bei Beibehaltung der Gewässergestaltung und der Dränagen, wie dies in den Entwicklungsalternativen 1 - 3 vorgesehen ist, eine entscheidende Gewässergüteverbesserung im Hinblick auf Nitrat und Ammonium nicht zu erreichen ist.

### **5.3.2 Entwicklungsalternativen 4 - 6**

#### **a) Grundwasserdynamik**

Für die Gestaltung der Grundwasserdynamik stellen die EA 4 - 6 günstigere Varianten dar. Die Herausnahme des größten Teils der Gräben und eine Aufgabe der unterirdischen Drainage führt zu einem Anheben der Wasserpiegel und ermöglicht dadurch einen günstigeren Bodenwasserhaushalt in niederschlagsarmen Zeiten. Außerdem kann der Einfluß der Keuperwasserstände sich im Profil der Aue frei entfalten, wo die Dränagen aus den Flächen entfernt wurden. Zu den bewirtschaftungsbedingten Auswirkungen auf den Bodenwasserhaushalt gelten die Auswirkungen zu EA 1 - 3 analog. Unter den Bedingungen der aufgegebenen Drainage kann allerdings das durch pflanzlichen Wasserentzug entstehende Bodenfeuchtedefizit durch ungehinderten Grundwasseraufstieg ausgeglichen werden.

Als kritisch ist der Verbleib von Altarmen der kanalisierten Unstrut zu bewerten. Diese Altarme wirken, wie die Modellierungsergebnisse zeigen, nach wie vor als grundwasserspiegel-senkendes Elemente auf die Grundwasserstände in der Aue. Dies gilt auch, wenn die Einbindung am unteren Auslauf über eine Sohlschwelle geschieht. Der Grundwasserstand wird dann (analog den Verhältnissen am "Nebenkanal 1.1" in der EA 3) bis auf dieses Niveau der Sohlschwelle abgesenkt.

Um die Wirkung des kanalisierten Unstrutaltarmes zu quantifizieren, wurde eine Variante (4.1) gewählt, die die Verfüllung dieses Altarmes zum Inhalt hat. Erwartungsgemäß führt dies zur weiteren Anhebung der Grundwasserstände in der Aue. Außerdem bietet diese Variante die Möglichkeit, einen Gewässerdynamikbereich zu entwickeln, der nicht von einem künstlichen Gewässerelement begrenzt ist.

Positiv auf den Bodenwasserhaushalt und die Entwicklung autotypischer Verhältnisse wird sich die Möglichkeit regelmäßiger Überflutungen auswirken. Die Modellierungsergebnisse zeigen, daß eine ungehinderte Überflutung auch einen signifikanten Einfluß auf die Grundwasserstände in der Aue haben wird.

## **b) Beschaffenheit**

Was den basalen Zufluß betrifft, gilt für die Entwicklung der Grundwasserbeschaffenheit generell das zu den EA 1 - 3 Ausgeführte. Eine Minderung der Zuflüsse in die Aue kann nur stattfinden, wenn in den Speisungsgebieten der Eintrag vermindert wird. Außerdem kann das zu einer Minderung von Stofffrachten in den der Unstrut zufließenden Nebengewässern führen. Der Transport von den Speisungsgebieten in die Nebentäler der Unstrut und danach über die Nebenflüsse in die Unstrut ist nicht Gegenstand dieses Forschungsprojektes gewesen, er stellt aber eine nicht zu vernachlässigende Größe dar, wie die Frachtbilanz in Kap. 4.3 ausweist.

Die Einflüsse aus dem Speisungsgebiet auf die Befruchtung von Oberflächengewässern in der Aue ist weiterhin ein nicht zu vernachlässigender Faktor, wie die Untersuchungen von HESSE (1998) zeigen. Die Gräben, die in der Aue entlastend auf den unmittelbaren Zustrom aus den Hangbereichen wirken, fangen deren Nitratfracht ab und führen sie dem Vorfluter zu. Dies konnte im Hauptuntersuchungsgebiet auch anhand des Karrengrabens nachgewiesen werden und muß für den Stettengraben unterhalb von Großengottern ebenso angenommen werden. Die aus hydraulischer Sicht gewollte Beibehaltung des Karrengrabens in seiner Funktion als "Fangdränung" (s. QUAST 1983) führt somit hinsichtlich der Beschaffenheit zu einem Zielkonflikt, soweit die Einträge in den Speisungsgebieten nicht gemindert werden.

Die Entwicklungsalternative 4 enthält weiterhin Problemzonen des basalen Grundwasserzuflusses in die Unstrut an den Stellen, wo durch die Sohlteflagen basale Sedimente oder gar der Keuper angeschnitten werden. Wird die Unstrut oberhalb des Felchtabachzuflusses nicht aus ihrem jetzigen Bett herausgenommen, wird es dort zu einem Basalzufluß aus dem Schilfsandstein kommen, der eine nicht zu vernachlässigende Nitratfracht mit sich bringt, wie der Pegel 0761 an der Straße Großengottern - Altengottern zeigt (Mittelwert: 204 mg/l).

Gleiches muß für die Abschnitte der kanalisierten Altarme der Unstrut gesagt werden. Sie behalten, soweit die Sohlteflagen unverändert bleiben, ihre entlastende Wirkung auf die tieferen Sedimente bei und unterliegen damit nach wie vor dem basalen Nitratzutritt aus dem Pleistozän. Eine Aufgabe (Verfüllung) der kanalisierten Altarme der Unstrut trägt somit auch zur Verbesserung der Gewässerbeschaffenheit bei.

Bei der Verlegung der Unstrut in ihr neues, naturnahes und mäandrierendes Gewässerbett muß darauf geachtet werden, daß die Gewässersohle die Liegendgrenze der bindigen und reduzierenden Talsedimente nicht unterschreitet und ein ausreichender Pufferraum gewährleistet wird.

Wird das naturschutzfachlich wünschenswerte Ziel der Erhaltung der kanalisierten Unstrutarme als Totarme, d.h. ohne Anbindung an den mäandrierenden Fluß, verfolgt, muß bei unveränderter Gewässersohllage weiterhin mit Nitratreintrag in den Altarm gerechnet werden, der dann zu einer zunehmenden Verlandung führen wird. Eine Anhebung der Gewässersohle ist somit für den längerfristigen Erhalt des Altarmes ebenso unabdingbar.

#### 5.4 Übertragung der Ergebnisse auf weitere Abschnitte des Unstrutraumes

Durch die Arbeit von Hesse (1998) wurden Voraussetzungen für eine direkte Übertragbarkeit der Forschungsergebnisse auf weitere Abschnitte des Unstruttales geschaffen.

Die hydrogeologischen Verhältnisse um Sömmerda zeigen, was den Aufbau des Grundwasserleiters betrifft, eine andere Charakteristik als das Hauptuntersuchungsgebiet. Es herrschen dort im Profil der Talsedimente rollige (kiesig-sandige) Sedimente vor, die von geringermächtigen bindigen Talsedimenten überdeckt werden. Durch diese Verhältnisse ist eine bessere hydraulische Verbindung zwischen Talgrundwasserleiter und Vorfluter gegeben als im Hauptuntersuchungsgebiet Bollstedt - Thamsbrück.

Alle Revitalisierungsmaßnahmen, die in Gebieten geplant sind, wo derartige hydrogeologische Verhältnisse wie im Raum Sömmerda angetroffen werden, müssen deren Spezifik berücksichtigen.

Für den Aspekt der *Grundwasserdynamik* bedeutet dies:

- Die Unstrut-Wasserstände korrelieren bei unmittelbarem hydraulischem Kontakt stärker mit den Grundwasserständen in der Aue. Das hat zur Folge, daß jede Gewässerbettanhebung auch zu einer weitreichenden Anhebung des Grundwasserstandes in der Aue führen wird.
- Hochwasserereignisse pflanzen sich stärker im Talgrundwasserleiter fort. Bei durchlässigen Talsedimenten findet ein unmittelbar wirkender Druckausgleich zwischen den Potentialhöhen des Gewässers und des Grundwassers statt.
- Der basale Druck wird auf Grund der höheren Durchlässigkeitsbeiwerte in den Talsedimenten an deren Basis abgebaut, so daß das vertikal aufwärtsgerichtete Druckpotential in den ob. Sedimentschichten geringer ist als über einem 8 - 10 m mächtigen bindigen Sedimentpaket, wie es zwischen Altengottern und Thamsbrück anzutreffen ist. Die Grabendränagen werden demzufolge in diesen Regionen einen höheren Anteil an Versickerungswasser und lateralen Zufluß aus dem Aquifer aufnehmen.

Für den Aspekt der *Beschaffenheit* sind die folgenden Ergebnisse der Arbeiten bei der Übertragbarkeit auf andere Unstrutabschnitte von Bedeutung:

- Die Stoffeinträge in den Speisungsgebieten führen zur Belastung in den Entlastungsgebieten und damit im Auengrundwasserleiter. Der Stoffabbau läuft unter den Bedingungen, wie sie im Hauptuntersuchungsgebiet vorliegen, wesentlich schneller ab und führt zu geringeren Nitratgehalten im Grundwasser als sie in der Umgebung von Sömmerda angetroffen wurden. Außerdem liegt in Gebieten mit bindig-organischem Sediment ein wesentlich höheres Reduktionspotential vor als in kiesigen Talabschnitten.
- Für die Ammoniuminträge in das Gewässer kann in den Bereichen mit mächtigen bindig-organischen Talsedimenten nicht in erster Linie die Bewirtschaftung verantwortlich gemacht werden, hier sind geogene Ammoniumgehalte zu berücksichtigen.
- Die Anhebung des Grundwassers in Lockergesteins-Bereichen mit bindiger Deckschicht kann sich positiv auf die Beschaffenheit des Grundwassers auswirken, wenn der Grundwasserstand soweit angehoben wird, daß wieder gespannte Verhältnisse entstehen und das Grundwasser geringerer Sauerstoffzufuhr ausgesetzt ist. Die Prozesse der Nitratreduktion werden dadurch unterstützt.

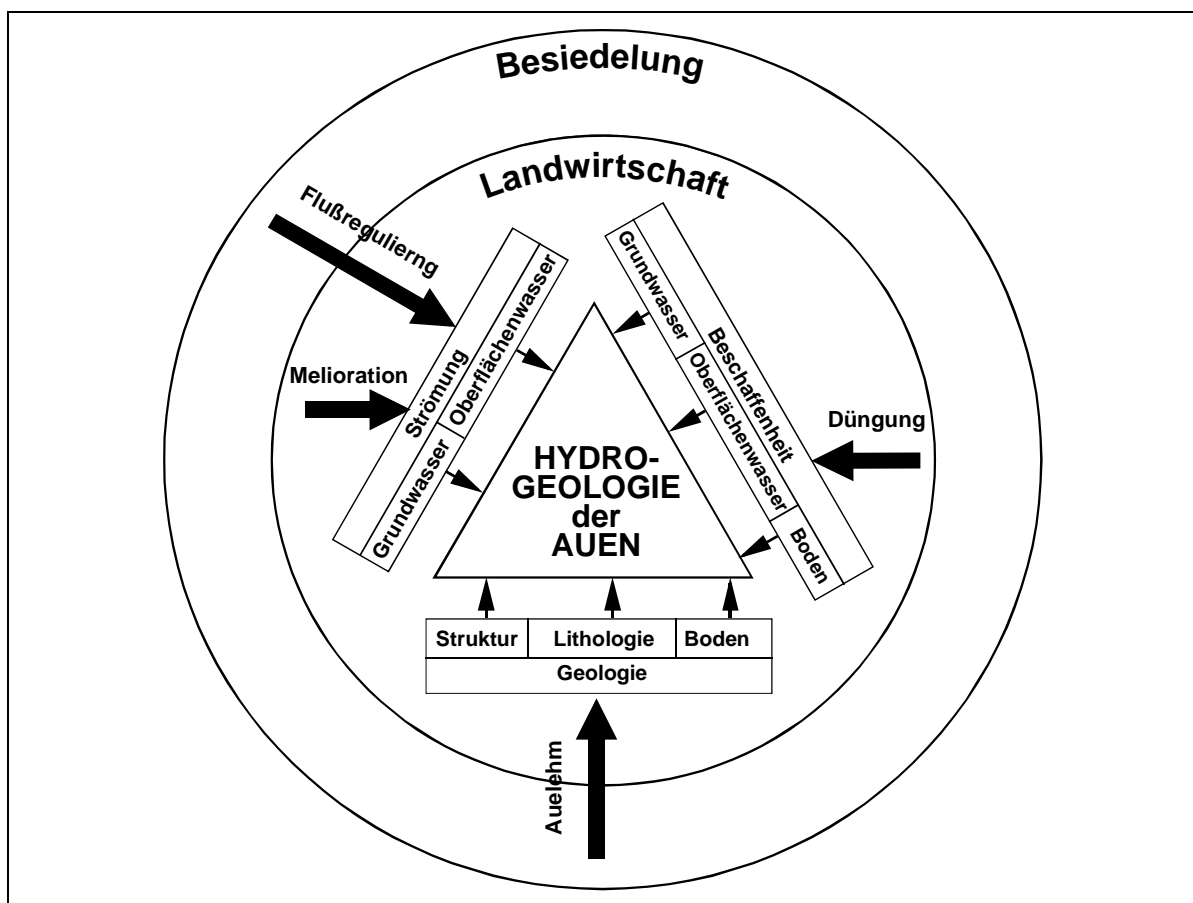
- Bei allen Maßnahmen der Gewässerverlegung entsteht ein genereller Zielkonflikt zu dem Ziel einer unmittelbaren Anbindung des Gewässers an den Talgrundwasserleiter. Aus Sicht der Gewässerbeschaffenheit kommt es darauf an, die Gewässer innerhalb der Auelehmschicht sowohl in ihrem Lauf als auch mit ihrer Sohltiefe zu belassen, da jeder basale Zufluß aus dem Talgrundwasserleiter eine Stofffracht mit sich bringt. Dies unterbindet jedoch eine aktive hydraulische Verbindung zwischen Aquifer und Gewässer.
- Wie die Ergebnisse der Oberflächenwasserbeprobung der Arbeit Hesse (1998) zeigen, können die Gräben, die als Fangdränage an dem Übergang von den Hanglagen in das Unstruttal wirken, eine starke Nitratfracht aufnehmen (s. Abb. 4.3-7). Zielführende Revitalisierungsmaßnahmen, die zu einer Erhöhung des Reduktionspotentials bereits am Talrand führen, sind deshalb vor allem in Talabschnitten mit kiesig-sandigen Talsedimenten vorzusehen.

### **5.5 Handlungsmatrix für Revitalisierungsmaßnahmen aus Sicht der Grundwasserdynamik und -beschaffenheit**

Die Untersuchungen des Teilprojektes Grundwasser zu Revitalisierungsmaßnahmen der Unstrutau haben gezeigt, wie komplex die Zusammenhänge zwischen Grundwasserdynamik, Stofftransport, Stoffumsätzen und Gewässerbeschaffenheit sind. Das menschliche Eingreifen in den Wasserhaushalt einer Aue hat nicht nur tiefgreifende Folgen für die Dynamik des Wassers sondern immer auch für die Beschaffenheit (s. Abb. 5.5-1).

Durch den hydraulischen Zusammenhang zwischen Speisungsgebiet und Aue hat darüber hinaus menschliches Handeln im Einzugsgebiet wiederum Einfluß auf das Ökosystem Aue. Dies begann mit der Besiedelung der Landschaft, die durch Rodungsarbeiten zur Ausbildung mächtiger Auelehmdecken führte. Diese Auelehmdecken erfüllen im Entlastungsgebiet heute eine wichtige Funktion beim Umsatz von Stoffen, die wiederum durch menschliches Handeln (Flächen- und Punktquellen) eingetragen werden. Andererseits können die Auelehmschichten zu einer hydraulischen Abkopplung des Gewässers von dem Talgrundwasserleiter führen. Dies hat zur Folge, daß die Grundwasserstände in der Aue nicht in jedem Falle mit dem Fluß korrelieren, was dem hydraulischen "Urzustand" der Aue widerspricht. Jede meliorative Maßnahme in der Aue, die mit dem Ziel, die Grundwasserstände abzusenken, die Auelehmschicht durchbricht, vermag diesen hydraulischen Kontakt zwar wieder zu ermöglichen, verlagert aber in der Folge dessen das Beschaffenheitsproblem unmittelbar in den Vorfluter. Die Frachtbilanzen im Untersuchungsgebiet Bollstedt - Thamsbrück belegen dies.

Um die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Bereiche des Unstrutgebietes zu ermöglichen, wurde aus Sicht der Grundwasserhydraulik eine Handlungs-Wirkungs-Matrix aufgestellt (Abb. 5.5-2). Diese zeigt auf, welche Wirkungsbereiche in ihrem Zustand von menschlichen Eingriffen abhängig sind. In den letzten drei Spalten sind die Wirkungsbereiche zu Ökosystemen zusammengefaßt worden. Diese Abhängigkeiten wirken sowohl in Richtung einer stärkeren anthropogenen Überprägung der Aue als auch in der Gegenrichtung und sind somit bei geplanten Revitalisierungsmaßnahmen wiederum zu beachten.



**Abb. 5.5-1: Einflußfaktoren auf das System von Flußauen**

Maßnahmen der Landnutzung sind im Rahmen des Projektes nur an landwirtschaftlicher Bewirtschaftung untersucht worden. Nichtlandwirtschaftliche Nutzungen (Besiedelung, Versiegelung der Landschaft, Bebauung etc.) müssen in diesem System mit betrachtet werden. Es zeigt sich aber bereits für den Sektor Landwirtschaft, daß die Bewirtschaftung auch Auswirkungen im Bereich der Grundwasserdynamik hat. Durch die Veränderung des Bodenwasserhaushaltes im Zusammenhang mit Drainagemaßnahmen werden die Prozesse der Grundwasserneubildung und damit des Grundwasserhaushaltes beeinflußt.

Untergeordnet ist hingegen der Einfluß von direkten Stoffeinträgen in der Aue, wie die Untersuchungen im TP 1 und TP 2 erbrachten. Demgegenüber führen bewirtschaftungsbedingte, wasserbauliche Maßnahmen zur starken Auswirkungen im Hinblick auf die Beschaffenheit. Diese müssen jedoch nicht nur negativ sein. So fangen unterirdische Dränagen, indem sie das Grundwasser absenken, Stoffströme des Sickerwassers ab, und leiten sie als Mischwasser mit dränierendem aufsteigendem Grundwasser dem Gewässer zu.

Was die wasserbaulichen Maßnahmen an Gewässer und Grabensystemen betrifft, so zeigen sich hier starke Abhängigkeiten zu den Faktoren der Dynamik. Vor allem Grundwasserflurabstände und Gewässerdynamik sind stark betroffen. Über die Gestaltung der Sohliefen von Gräben und Vorfluter bekommen die wasserbaulichen Maßnahmen auch eine beschaffenheitsrelevante Dimension.

Wirkungsbereich Handlungsbereich	Dynamik						Beschaffenheit					Ökosystem		
	GW-Flurabstände	Bodenwasserhaushalt	Gewässerdynamik	HW-Dynamik	GW-Fließrichtung	GW gespannt / ungespannt	Stoffeinträge GW (Speisungsgebiet)	Stoffeinträge OFW (Speisungsgebiet)	Stoffeinträge GW (Entlastungsgebiet)	Stoffeinträge OFW (Entlastungsgebiet)	Stoffumsatz / Stofftransport	Gewässer	Aue	Einzugsgebiet
<b>Landnutzung</b>														
Bewirtschaftung	■	■			■		■	■	□	□	□			
Nährstoffeinsatz							■	■	□	□	■			
unterird. Dränage	■	■			■	■					■			
oberird. Dränage	■	■	□		■	■					■			
<b>Wasserbau</b>														
Gewässerausbau	■	□	■	■	■	■					■			
Stauhaltungen	■	□	■	■	■	□								
HW-Schutzmaßnahmen	□	□	■	■	□	□			□	□				
Gewässer-Sohlntiefen	■		□	□	□	■			■	■	■			
<b>Wassernutzungen</b> <sup>1)</sup>														
landw. GW-Nutzungen	■		□		□						□			
nicht-landw. GW-Nutzungen	■			■	□									

starke Abhängigkeit   
 weniger starke Abhängigkeit   
 keine Abhängigkeit

stark betroffen   
 nicht unmittelbar betroffen   
 nicht betroffen

<sup>1)</sup> Die Wirkung landwirtsch. und nicht-landwirtsch. Wassernutzungen war nicht Gegenstand der Untersuchungen

**Abb. 5.5-2: Handlungs-Wirkungs-Matrix für Revitalisierungsmaßnahmen**

Die Auswirkungen von Wassernutzungen wurden im Projekt nicht näher untersucht. Als landwirtschaftliche Wassernutzungen sollen hier Entnahmen in der Aue verstanden werden, die z.T. aus dem Auengrundwasserleiter aber auch aus den Oberflächengewässern erfolgen. Die Beregnung beeinflusst den Wasser- und Stoffhaushalt sowohl des Bodens als auch der Aue insgesamt in starkem Maße, ganz abgesehen davon, daß jede Art von Beregnung in der Aue ein Anachronismus ganz eigener Art ist.

Unter nichtlandwirtschaftlicher Wassernutzung sollen hier vor allem kommunale und betriebliche Wasserversorgungen verstanden werden. Diese finden im Hauptuntersuchungsgebiet vor allem im Bereich des Keupers statt und stellen somit keinen relevanten mengenmäßigen Anteil am Wasserhaushalt dar. Im Bereich Sömmerda sind die Nutzungen aufgrund der Ausbildung des Talgrundwasserleiters in der Aue angesiedelt und

müssen bei jeder Meßnahme der Revitalisierung der Aue in die Betrachtungen eingeschlossen werden.

## 5.6 Zwischenzusammenfassung

Im ersten Abschnitt werden die Entwicklungsalternativen (EA) 1 - 6 hinsichtlich ihrer auf die Grundwasserdynamik wirkenden Faktoren beschrieben.

In den *Entwicklungsalternativen 1 - 3* können sich die Grundwasserstände, die durch den Druck aus dem Liegenden bestimmt werden, nicht entwickeln, solange die Dränage erhalten bleibt, durch die der Grundwasseraufstieg gebrochen wird. Dies bleibt somit der gravierendste Eingriff in der Aue, der eine naturnahe Grundwasserdynamik unterbindet. Wird die Grundwasserneubildung als weiterer Faktor für die Grundwasserstände durch geänderte Bewirtschaftung erhöht, so ist mit langfristig hohen Grundwasserständen zu rechnen. Eine gezielte Stauhaltung der Gräben, wie am Nebenkanal 1.1 nachgewiesen, kann die Grundwasserstände auch in diesen Entwicklungsalternativen erhöhen und wäre damit zielführend.

Wird die Unstrut selbst als entlastendes Element mit ihren Sohlagen beibehalten, trägt sie zusätzlich zur Brechung des vertikal aufsteigenden Grundwasserstromes bei.

Hinsichtlich der Wirkung von Hochwasserereignissen tragen die Entwicklungsalternativen 1 - 3 im Untersuchungsgebiet zwischen Bollstedt und Thamsbrück nicht zu einer Anhebung der Grundwasserstände bei, da die Unstrut innerhalb der Deiche abgeleitet wird und die Hochwasserereignisse demzufolge zwar hoch aber kurz sind.

Die Beibehaltung der Oberflächen- und Grabendränage in den Entwicklungsalternativen 1 - 3 mit ihren Sohlängen bis in 2 m und darunter hat aber nicht nur Auswirkungen auf den Wasserhaushalt sondern entscheidend auch auf die Wasserbeschaffenheit hinsichtlich des Eintrages von Ammonium, wenn sie den Grundwasserstand soweit absenken, daß dies zu einer Oxidation des offenbar geogen entstandenen Ammoniums zu Nitrat führt.

Für die kanalisierte Unstrut muß im Hinblick auf den Nitratintrag folgendes geschlußfolgert werden: bindet die Sohle in die stärker mit Nitrat belasteten Pleistozänhorizonte ein, wird der Unstrut auf dem Wege des direkten Grundwasserzutritts Nitrat zugeführt.

Diese Fakten führen zu der Einschätzung, daß bei Beibehaltung der Gewässergestaltung und der Dränagen, wie dies in den Entwicklungsalternativen 1 - 3 vorgesehen ist, eine entscheidende Gewässergüteverbesserung im Hinblick auf Nitrat und Ammonium nicht zu erreichen ist.

Für die Gestaltung der Grundwasserdynamik stellen die *EA 4 - 6* günstigere Varianten dar. Der Einfluß der Keuperwasserstände kann sich in der Aue frei entfalten, wo die Dränagen aus den Flächen entfernt wurden. Als kritisch ist jeglicher Verbleib von Altarmen der kanalisierten Unstrut zu bewerten. Diese Altarme wirken, wie die Modellierungsergebnisse zeigen, nach wie vor als grundwasserspiegel-senkendes Elemente auf die Grundwasserstände in der Aue. Eine Verfüllung der Altarme führt zur weiteren Anhebung der Grundwasserstände in der Aue. Außerdem bietet diese Variante die Möglichkeit, einen

Gewässerdynamikbereich zu entwickeln, der nicht von einem künstlichen Gewässerelement begrenzt ist.

Was den basalen Zufluß betrifft, gilt für die Entwicklung der Grundwasserbeschaffenheit generell das zu den EA 1 - 3 Ausgeführte. Eine Minderung der Zuflüsse in die Aue kann nur stattfinden, wenn in den Speisungsgebieten der Eintrag vermindert wird. Die Entwicklungsalternative 4 enthält weiterhin Problemzonen des basalen Grundwasserzuflusses in die Unstrut an den Stellen, wo durch die Sohlflagen basale Sedimente oder gar der Keuper angeschnitten werden. Hier kann es weiterhin zu basalen Nitratzufuhren kommen. Bei der Verlegung der Unstrut in ihr neues, naturnahes und mäandrierendes Gewässerbett muß demnach darauf geachtet werden, daß die Gewässersohle die Liegendgrenze der bindigen und reduzierenden Talsedimente nicht unterschreitet und ein ausreichender Pufferraum gewährleistet wird.

Bei der *Übertragung der Ergebnisse auf den Unstrutraum* sind vor allem die unterschiedlichen Ausbildungen des Talgrundwasserleiters zu beachten. Hier ist zwischen vorrangig bindigen und überwiegend rolligen Sedimenten zu unterscheiden, da die Zusammensetzung der Sedimente nicht nur Auswirkungen auf die Dynamik sondern auch auf die Beschaffenheit des Grundwassers hat.

Um die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Bereiche des Unstrutgebietes zu ermöglichen, wurde aus Sicht der Grundwasserhydraulik eine Handlungs-Wirkungs-Matrix aufgestellt. Diese zeigt auf, welche Wirkungsbereiche in ihrem Zustand von menschlichen Eingriffen abhängig sind. Starke Abhängigkeiten auf Grundwasser- und Stoffdynamik gehen dabei von der Bewirtschaftung, von der Existenz von Drainage und von Maßnahmen des Gewässerausbaus aus.



## **6 Ausblick und Weitergehender Forschungsbedarf**

### **6.1 Übertragung der Methodik für die Planung von Revitalisierungsmaßnahmen**

#### **6.1.1 Übertragung auf das Unstrut-Gebiet**

Aus den bisherigen Untersuchungen ergeben sich methodische Ansätze, die für die Betrachtung der Grundwasserdynamik und -beschaffenheit bei weiteren Planungen von Revitalisierungsmaßnahmen der Unstrut-Aue berücksichtigt werden sollten.

- Die Interaktion zwischen Fluß und Aue ist abhängig von der Verbreitung des Auelehmes und davon, ob der Fluß in dem Auelehm verbleibt oder aus dessen Verbreitungsgebiet verlagert wird. Demzufolge sind Kartierungen der Deckstauer-Verbreitung vorzunehmen oder entsprechende Kartierungsergebnisse bei den Planungen zu berücksichtigen.
- Die Dynamik des Grundwassers in den Speisungsgebieten kann die Dynamik der Grundwasserstände in der Aue signifikant beeinflussen. Entsprechende Untersuchungen dieser Zusammenhänge der Grundwasserdynamik sind vorzunehmen. Insbesondere können durch den Ganglinienvergleich repräsentativer Meßstellen im Speisungs- und Entlastungsgebiet hydraulische Zusammenhänge aufgeklärt werden. Die in TLU / TLG (1996) dargestellten Auswertungen von Loggerdaten des Staatlichen Netzes sollten hierzu gezielt auch für die Fragestellungen der Interaktion zwischen Speisungs- und Entlastungsgebieten herangezogen werden.
- Im Hinblick auf die Beschaffenheit des Grundwassers und des Vorfluters hat sich aus den Untersuchungen ergeben, daß die Speisungsgebiete für Einträge relevant sind. In weitere Planungsarbeiten sollte deshalb immer auch auf das Eintragungspotential in den Speisungsgebieten geachtet werden und darauf ein Ranking der Revitalisierungsgebiete abgestellt werden.
- Eine anthropogen wenig überprägte Aue kann unter günstigen geologischen Bedingungen (Sedimente mit hohem organischen Anteil) ein ausgeprägtes Stoffwandlungspotential besitzen. In alle Planungsarbeiten sind deshalb sediment-chemische Untersuchungen mit dem Untersuchungsziel des Stoffabbaupotentials einzubeziehen.
- Wasserbauliche Maßnahmen können Stoffströme induzieren, die zu einer Befrachtung des Vorfluters z.B. mit Nitrat führen. Diese Prozesse sind durch eine Verknüpfung der Sohlkartierung des Gewässers mit geologischen Informationen aufzuklären und zu prognostizieren, um Revitalisierungsplanungen, die wasserbauliche Maßnahmen beinhalten, zielführend durchführen zu können.

## **6.1.2 Übertragung auf das Elbe-Einzugsgebiet**

Innerhalb des Forschungsverbundes Elbe-Ökologie zeichneten sich die Untersuchungen zu Grundwasserdynamik und Beschaffenheit in der Unstrutau dadurch aus, daß die Grundwasserverhältnisse nicht nur in der unmittelbaren Umgebung des Vorfluters betrachtet wurden, sondern die Prozesse in der Aue in den Zusammenhang mit den Speisungsgebieten gesetzt wurden.

Für die Übertragung auf den Elbe-Raum können auf Grund der Methodik der Arbeiten und der Ergebnisse die folgenden Schlußfolgerungen gezogen werden.

- Die Prozesse der Grundwasserdynamik in der Flußau können nur auf einem ganz begrenzten Raum (vertikal und horizontal) als Ergebnis der Interaktion mit dem Fluß gesehen werden. Wesentliche Änderungen der Grundwasserdynamik gehen von den Einflüssen aus den Speisungsgebieten aus, wobei hier die hydrogeologischen Randbedingungen immer mit beachtet werden müssen. Im Hinblick auf den Elbe-Flußraum ist dabei mit größeren Dimensionen zu rechnen. Die Untersuchungen an der Unstrut können dafür aber einen zielführenden Ansatz bieten.
- Stoffliche Veränderungen des Grundwassers sind raum-zeitlich zu betrachten. Der Stoffeintrag im Bereich der Aue selbst stellt dabei nur einen Teil-Stoffstrom dar, der im Zusammenhang mit den aus dem Speisungsgebiet eingetragenen Stoffströmen zu betrachten ist.
- Die wasserbaulichen (meliorativen) Maßnahmen können auf Grund geologischer Gegebenheiten auch eine Komponente induzierter Stoffströme beinhalten und sind darauf hin in alle Betrachtungen bei deren Behandlung mit einzubeziehen. Dies gilt in jedem Falle in den Gebieten, wo durch Grabensysteme die Auelehmdecke durchstoßen wird.

## **6.2 Weitergehender Forschungsbedarf**

### **6.2.1 Forschungsbedarf im Bereich des Unstruttals**

Ausgehend von den Untersuchungsergebnissen wird für den Bereich des Unstruttals folgender weitergehender Forschungsbedarf gesehen.

- Die Dynamik des Stoffeintrages in den Speisungsgebieten war nicht Gegenstand der Forschung im abgeschlossenen Projekt. Durch die Anwendung eines Einzugsgebietsmodells (AKWA-M) konnten aber verwendbare Ergebnisse im Hinblick auf die Dynamik der Grundwasserneubildung im Speisungsgebiet gewonnen werden. Die Kopplung von einzugsgebietsbezogenen Ablußmodellen, die auch die Dynamik der Stoffeinträge darzustellen vermögen, mit einem Grundwassermodell wird auch für den Unstrutraum als dringender Forschungsbedarf gesehen.
- Bei der Betrachtung der Stoffwandlungsprozesse konzentrierte sich das abgeschlossene Projekt auf die Prozesse in der Aue, mit dem Ziel, das Stoffabbaupotential zu ermitteln. Nicht berücksichtigt wurde das Stoffabbaupotential des Transitgebietes (Tonsteine des unteren Gipskeupers). Hierzu besteht Forschungsbedarf, um die Frage zu klären, ob die

Nitratgehalte des Pleistozäns ein Ergebnis der Stoffumwandlung im Transitgebiet sind und in welchem Maße mit einem Stoffabbau im Transitgebiet gerechnet werden kann.

- Die Untersuchungen sind mit Isotopenuntersuchungen zu koppeln, um die Verweilzeiten des Grundwassers im Transitgebiet in ein konzeptionelles Modell einbeziehen zu können.
- Im Gebiet von Artern (Artern bis Landesgrenze) ist es durch Subrosionserscheinungen zu einem bis zu 120 m mächtigen Quartärbecken gekommen. Es muß vermutete werden, daß es sich hierbei um abflußlose Quartärbecken handelt. Inwieweit die tieferen Bereiche des Quartärbeckens an dem Wasserhaushalt, der die Grundwasserdynamik der Unstrutau beeinflusst, teilnimmt, ist durch weitere Forschungsarbeiten aufzuklären. Hierzu sind teufendifferenzierte Grundwasserbeprobungen, verbunden mit Isotopenuntersuchungen geeignete methodische Ansätze. Hierbei kann auch auf Ergebnisse der Limnologie (hydrochemische Schichtung in Seen) zurückgegriffen werden.

### **6.2.2 Forschungsbedarf zu allgemeinen Fragestellungen**

Forschungsbedarf wird über die Fragestellungen des Unstrut-Projektes hinaus zu folgenden Komplexen gesehen:

- Die Ergebnisse der hydrochemischen Beprobung in den Auensedimenten haben Ammoniumgehalte im Wasser erbracht, die auf eine Ammoniumfreisetzung in den organischen Sedimenten der Aue schließen lassen. Diese Effekte sind einerseits aus der Niedermoorforschung bekannt, andererseits gibt es auch derartige Hinweise auf Ammoniumfreisetzung aus Braunkohlengebieten. Der geogene Stickstoffeintrag ist demnach in jede Stoffbilanzierung einzubeziehen. Dies gilt auch für anorganische Sedimente, wie z.B. Untersuchungen an Tongesteinen erbrachten (WuA 1999). Forschungsbedarf wird deshalb zum generellen geogenen Stickstoffeintragspotential gesehen. Dies sollte formations- und lithologiebezogen durchgeführt werden.
- Die Herkunft einzelner Stickstoffkomponenten im Grundwasser und im Bodenwasser wurde im angeschlossenen Projekt aus den geologischen, pedologischen und hydraulischen Verhältnissen abgeleitet. Durch Isotopenuntersuchungen an Stickstoffverbindungen (Nitrat und Ammonium) ist die Herkunft der einzelnen Komponenten sowie ihre Verteilung im Boden und Grundwasser nachzuweisen. Mittels Isotopenuntersuchungen wird auch ein Weg gesehen, geogenen Stickstoffeintrag zu erfassen.
- Bezüglich der modellmäßigen Abbildung der Rückkopplung zwischen Grundwasserneubildung und Grundwasserflurabständen besteht weiterhin Forschungsbedarf, was die Weiterentwicklung geeigneter Grundwassermodellsysteme betrifft. Hier sind Bodenwasserhaushalts-Komponenten zu integrieren.

## 7 Zusammenfassung

Vom 1. 9. 1996 bis 30. 11. 1999 wurde am Dresdner Grundwasserforschungszentrum e.V. das Teilprojekt 1 - Grundwasserdynamik und -beschaffenheit - im Rahmen des BMBF-Forschungsvorhabens "Reviatlisierung Unstrutau" (Zuwendungsempfänger Thüringer Landesanstalt für Umwelt, Förderkennzeichen 033 9572) bearbeitet.

Inhalt des Teilprojektes I - Grundwasserdynamik - war die Untersuchung der Wechselwirkungen hinsichtlich Grundwasserdynamik und -beschaffenheit zwischen den Speisungsgebieten und dem Entlastungsgebiet der Unstrutau mit dem Ziel, Kriterien aus Sicht der Grundwasserdynamik für Revitalisierungsmaßnahmen an weiteren Abschnitten der Unstrut zu erarbeiten. Ausgangspunkt der Arbeiten waren die lokalen hydrogeologischen Gegebenheiten im Unstruttal. Die Unstrutau ist das Entlastungsgebiet für die regionale Grundwasserströmung. Der Grundwasserstrom ist in der Aue vertikal aufwärts gerichtet. Stoffe aus den auefernen Höhenlagen werden über die liegenden Auensedimente ausgetragen. Grundsätzlich wurden dabei zwei typische Stoffströme unterschieden: dem vertikal-abwärtsgerichteten in den oberen Horizonten der Aue und dem in den tieferen Auenschichten vertikal-aufwärtsgerichteten Stoffstrom, der seine Quellen in den Speisungsgebieten hat.

Durch intensive Feldarbeiten wurden zunächst die hydrogeologischen Verhältnisse im Hauptuntersuchungsgebiet aufgeklärt. Dies begann mit der Aufnahme der vorhandenen Meßstellen, der Einmessung zusätzlicher Meßpunkte an Oberflächengewässern sowie Durchflußmessungen. In der Aue und im nördlichen Speisungsgebiet wurden insgesamt drei Grundwassermeßstellen (1 Doppelpiegel (Keuper und Quartär) und 2 Einfachmeßstellen (Keuper)) gesetzt und mit Datenloggern zur Wasserstandsmessung ausgerüstet. Die Auensedimente wurden mittels Drucksondierungen im 300-m-Raster erbohrt. Auf einem Profil der Drucksondierungen wurden teufenorientierte Grundwassersammler in das Auensediment eingebaut. Insgesamt wurden im Projektzeitraum 19 Stichtagsmessungen durchgeführt, um die regionale Grundwasserdynamik zu erfassen. Die Beschaffenheit des Grund- und Oberflächenwassers wurde zu insgesamt 6 Zeitpunkten gemessen. Zusätzlich wurden die Grundwassersammler in der Aue 9 mal beprobt.

Für eine Detailuntersuchung an einem Nebeneinzugsgebiet der Unstrut wurden kontinuierliche Abflußmessungen am Nordmar über 5 Monate vorgenommen.

Die Labor-Arbeiten hatten zwei Schwerpunkte. Die Grundwasserproben waren auf ihre geogenen und anthropogenen Inhaltsstoffe zu untersuchen. Schwerpunkt waren dabei insbesondere Stickstoff- und Schwefel-Verbindungen.

Die Prozeßuntersuchungen hatten zum Ziel, die wesentlichen Stoffwandlungsprozesse und das Reduktionsvermögen der Auensedimente zu beschreiben. Dazu wurden Batch-Versuche (insgesamt 3 Versuche mit jeweils 4 Ansätzen) und ein Säulenversuch durchgeführt.

Das Untersuchungsgebiet zwischen Bollstedt und Thamsbrück war außerdem in einem Grundwassermodell abzubilden. In dieses wurden die Schichten des liegenden verkarsteten Gipskeupers einbezogen, da dieser, wie die Auswertung hydrogeologischer Unterlagen zeigten, der wesentliche Horizont für die Grundwasserströmung vom Speisungs- zum

Entlastungsgebiet darstellt. Mit dem Grundwassermodell konnten die Auswirkungen der von der Projektgruppe erarbeiteten Entwicklungsalternativen auf Grundwasserflurabstände im Altengotterschen und Großgotterschen Ried berechnet werden. Außerdem wurden instationäre Szenarien für den Ist-Zustand zur Wirkung eines Unstrut-Hochwassers auf den Grundwasserstand im Deichhinterland und zur Wirkung von Grundwasserneubildung in der Aue gerechnet. Eine weitere instationäre Berechnung zeigt die Auswirkung eines Unstrut-Hochwassers auf die Grundwasserstände im Altengotterschen und Großgotterschen Ried bei mäandriertem Unstrutverlauf.

Die Ergebnisse der Untersuchungen lassen sich wie folgt zusammenfassen.

Die Grundwasserdynamik wird in den Entlastungsgebieten in starkem Maße von der Dynamik im Speisungsgebiet bestimmt. Diese ist abhängig von der Grundwasserneubildung und bewirkt eine Dynamik des Wasserdrucks auf das Grundwasser im Entlastungsgebiet. Ein vertikal aufwärts gerichteter Grundwasserstrom im Entlastungsgebiet reagiert auf die Druckverhältnisse aus den Speisungsgebieten. Die Interaktion zwischen Fluß und Grundwasser in der Aue ist nur in Gebieten mit sandig-kiesigen Talsedimenten relevant, wenn der Fluß nicht durch mächtige Auelehmschichten hydraulische vom Talgrundwasser abgekoppelt ist.

Mit dem Grundwasserstrom aus den Speisungsgebieten in die Entlastungsgebiete werden maßgebliche Stofffrachten mitgeführt. Die Stoffeinträge an Nitrat in das Grundwasser liegen in den Speisungsgebieten um ein vielfaches höher als in den Entlastungsgebieten. In den Entlastungsgebieten kommt es zur Reduktion des Nitrats. Die Stoffumwandlungen sind je nach Ausbildung des Sediments unterschiedlich und können in stark organischen Sedimenten bis zum vollständigen Abbau des Nitrats und bis zur Sulfatreduktion gehen.

Die wasserbaulichen und meliorativen Maßnahmen im Entlastungsgebiet, die unter den Gesichtspunkten einer maximalen landwirtschaftlichen Nutzung der Aue und des Hochwasserschutzes angelegt wurden, haben nachweisbare Auswirkungen auf den Wasser- und Stoffhaushalt in der Aue. Die Absenkung der Grundwasserstände in der Aue wirkt sich nicht nachweislich auf eine Verringerung der Reduktionswirkung der Aue aus, sondern hat eher Auswirkungen auf die Bewirtschaftung. Jedoch führte die Vertiefung der Unstrut dazu, daß nitratangereichertes Grundwasser durch die tiefen Sohllagen der Unstrut dieser zufließt. Dies kann sowohl aus dem Pleistozän als auch aus dem Schilfsandstein (Keuper) erfolgen.

Der Nitratabbau geht nach den Ergebnissen der Laborversuche mit einer Ammoniumbildung einher. Die Ergebnisse der Felduntersuchungen haben dabei gezeigt, daß die Ammoniumbildung nicht allein auf die Nitratammonifizierung zurückzuführen ist. Die Ammoniumbildung in den oberen Grundwasserbereichen der Aue muß auch mit einer Ammonifizierung organischer Substanz (Torf) erklärt werden. Dies hat zur Konsequenz, daß die in diesem Teufenbereich einbindenden Kanäle und Gräben zur Drainage auch geogenes Ammonium mobilisieren können.

Auf Grund der Untersuchungs- und Prognoseergebnisse zu Grundwasserdynamik und -beschaffenheit werden die Entwicklungsalternativen beschrieben. Eine Handlungs-Wirkungs-Matrix soll Kriterien aufzeigen, die für Revitalisierungsmaßnahmen im Unstrut-Gebiet relevant sind.

Bezogen auf die Ökologie von Auensystemen im Elbeeinzugsgebiet haben die Untersuchungen an der Unstrut gezeigt, daß die Entlastungsgebiete nur im Zusammenhang mit der Dynamik und Beschaffenheit der Speisungsgebiete zu betrachten sind.

## 8 Literatur

BCE (1998):

BMBF-Forschungsprojekt Unstrutrevitalisierung - Teilprojekt Gewässer- und Auenentwicklung, 1. Zwischenbericht, Erfurt, 17. 9. 1998 (unveröff.)

BIERER, S., FLINSPACH, D. et al. (1987):

75 Jahre Landeswasserversorgung. 1912 - 1987 Stuttgart 1987.

BINDER W u. WAGNER I (1994):

Schutz der Binnengewässer Buchwald/Engelhardt (Hrsg.) Umweltschutz - Grundlagen und Praxis (Bd. 5) Economica Verlag, Bonn, 1994

BLAW Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft (1996):

Ökologisch begründete Sanierungskonzepte kleiner Fließgewässer, Fallbeispiel Vils/Oberfalz. Schriftenreihe des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft, H. 26, München, 1996

BMBF (1995):

Forschungskonzeption Ökologische Forschung in der Stromlandschaft Elbe (Elbe-Ökologie) des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF), Bonn, August 1995

DOCKTER, J. (1995):

Keuper - In: Seidel, G. (Hrsg.): Geologie von Thüringen (S. 332 - 362).  
E. Schweizerbartsche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 1995.

DVWK (1988):

Bedeutung biologischer Vorgänge für die Beschaffenheit des Grundwassers  
Schriftenreihe des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V.  
H. 80; Paray, Hamburg, Berlin, 1988

ENGBER, T. (1999):

Beitrag zur Hydrogeologie der Schwefelquellen von Bad Langensalza.  
Institut für Geowissenschaft der Friedrich-Schiller-Universität Jena, Diplomarbeit  
(unveröff.) 68 S.

GABRIEL, B, ZIEGLER, G. u. JACOBS, H. (1993):

Zur GWN-Berechnung für Festgesteinsgrundwasserleiter auf der Grundlage des Modells GEFEMLAW und seiner Weiterentwicklung.  
In: Grundwasserneubildung - 10. Kolloquium Hydrogeologie, Erfurt, 13./14. Oktober 1993 - Eigenverlag KdT e.V., S. 38 - 56.

GEPP, J. (1986):

Auengewässer als Ökozellen – Fluß – Altarme, Altwässer und sonstige Augen-Stillgewässer In: Grüne Reihe, Bundesminist. f. Gesundheit und Umweltschutz, Wien, 4 (1993) 2. Aufl., 322 S.

GRUMBT, E., KÄSTNER, H u. LÜTZNER, H. (1997)

Erläuterungen zur Geologischen Karte 1 : 25.000 von Thüringen -  
Blatt Schlotheim (Nr. 4729) und Blatt Ebeleben (Nr. 4730).  
Hrsg.: Thüringer Landesanstalt für Geologie, Weimar, 1997.

- GUTT, B. (1998):  
Anwenderinstruktion zum Programmsystem MINIHO-3.3.  
Dresdner Grundwasser Consulting GmbH, (unveröff.) 1998.
- HANNAPPEL, S. u. TIMER, K (1999):  
Redundanzprüfung von Grundwasserstandsdaten als Arbeitsmethode zur  
Optimierung von Grundwassermeßnetzen. - Vortrag zu den 7.  
Grundwasserforschungstagen,  
27. - 28. 9. 99 Grundwassermonitoring (Tagungsband)  
Dresdner Grundwasserforschungszentrum e.V., Dresden 1999.
- HESSE, G. (1998):  
Grundwasserhydraulik und -beschaffenheit der Unstrut- und Saale zwischen Wundersleben  
und Leubingen. Institut für Geowissenschaft der Friedrich-Schiller-Universität Jena,  
Diplomarbeit (unveröff.) 44 S., 16 Abb., 5 Anl.
- IVEN, H. (1987):  
Vorsorgemaßnahmen zur Beseitigung negativer Auswirkungen von  
Grundwasserabsenkungen im Hessischen Ried.  
Vortrag zum Forum "Auswirkungen großer Grundwasserentnahmen"  
unveröff., 13. 3. 1987
- JÄGER, K. D. (1962):  
Über Alter und Ursachen der Auelehmlagerungen thüringischer Flüsse. Prähist.  
Zeitschr. Berlin 40: 1-60
- JÜRGING, R. u. GRÖBMAIER, W (1998):  
Sanierung und Neuanlage von Altgewässern  
In: Wasser/Abwasser/Praxis (WAP) Heft 2/98, S. 16-18
- KAISER, E. u. NAUMANN, E. (1905):  
Erläuterungen zur Geologischen Karte von Preußen, Blatt Langensalza  
Berlin, 1905
- KÄSTNER, H. (1991):  
Ergebnisbericht mit Vorratsberechnung Erkundung Ziegelton Altengottern.  
Unveröff., Geol. Landesuntersuchung GmbH Jena, 1991.
- KNOBLAUCH, S. u. ROTH, D. (2000):  
*Sickerwasserqualität und Stoffaustrag aus landwirtschaftlichen Nutzflächen in der  
Aueniederung und im Wasserspeisungsgebiet.* - Abschlußbericht TP 2 des BMBF-  
Projektes "Revitalisierung Unstrut- und Saale" (FKZ: 033 9572). Thüringer Landesanstalt für  
Landwirtschaft, Jena (im Druck).
- KRAFT, W. u. SCHRÄBER, D (1982):  
Grundwasserspendenschlüssel und ihre Anwendung bei der Ermittlung des  
Grundwasserdargebotes in Festgesteins-Grundwasserleitern.  
In: Z. Angew. Geol., Bd. 28, H. 4, S. 154 - 161.
- KRAFT, W. u. SZYMCZAK, P. (1993):  
Die Erfahrungen mit den Schlüsselkurven im Festgestein.  
In: Grundwasserneubildung - 10. Kolloquium Hydrogeologie, Erfurt, 13./14. Oktober  
1993 - Eigenverlag KdT e.V., S. 57 - 79



- LIEBER, A. (1999):  
Dokumentation und Kalibrierung von AKWA-M für das Gebiet Nordharz  
Institut für Hydrologie und Meteorologie der Technischen Universität Dresden,  
Dresden 1. 10. 1999 (unveröff.)
- MALT, S. u. PERNER, J. (1999):  
Ökologische Bewertung und Biomonitoring - Auswirkung der Bewirtschaftungsform  
auf die Biozönose. - Abschlußbericht TP 3 des BMBF-Projektes "Revitalisierung  
Unstrut- und Saale" (FKZ: 033 9572). Institut für Ökologie, Friedrich-Schiller-Universität  
Jena (unveröff.), 108 S.
- MÜLLER, M. (1994):  
Natürliche Grundwasserneubildung im Verdichtungsraum der Region Oberes Elbtal /  
Ostharzgebirge. Institut für Grundwasserwirtschaft der Technischen Universität  
Dresden, Diplomarbeit, 1994 (unveröff.)
- MÜNCH, A. (1995a):  
Wasserhaushaltsberechnungen für Mittelgebirgseinzugsgebiete unter  
Berücksichtigung einer sich ändernden Landnutzung.  
Dissertation, Fakultät für Bau-, Wasser und Forstwesen, TU Dresden
- MÜNCH, A. (1995b):  
AKWA-M, Wasserhaushaltsmodell, Version 2.22, Programmdokumentation  
Institut für Hydrologie und Meteorologie der Technischen Universität Dresden.
- NEFF, M. u. REISINGER, E. (Bearb.) (2000):  
*Gewässer- und Auenentwicklung*. - Abschlußbericht TP 7 des BMBF-Projektes  
"Revitalisierung Unstrut- und Saale" (FKZ: 033 9572). Thüringer Landesanstalt für Umwelt,  
Jena (im Druck).
- QUAST, J. (1983):  
Beitrag zur Entwicklung von Entwurfs- und Steuerungsmethoden sowie technischer  
Lösungen für bedarfsgerechte Systeme der Bodenwasserregulierung.  
Dissertation, Technische Universität Dresden, 1983.
- RAUSCH M (1997):  
Kritische Anmerkungen zur "Ökologischen Gesamtplanung Weser". Wasser u.  
Boden 49: 21 - 25
- RÖDELSBERGER, M. (1984):  
Stickstoffhaushalt und -umsetzungen in der ungesättigten Zone unterhalb des  
Wurzelraums und in der gesättigten Zone (Grundwasser). Studie im Auftrag des  
Ministeriums für Ernährung, Landwirtschaft, Umwelt und Forsten Baden  
Württemberg, 1984
- ROHMANN, U. u. SONTHEIMER, H. (1985):  
Nitrat im Grundwasser.  
DVGW-Forschungsstelle am Engel-Bunte-Institut der Universität Karlsruhe, 1985
- RÖBNER, U. (1996):  
Kinetik mikrobieller Stoffumwandlungsprozesse im Grundwasserleitersystem mit Hilfe von  
Labormodellen. Proceedings des Dresdner Grundwasserforschungszentrums, H. 10,  
Dresden, 1996

SCHÖNIGER, M. (1990):

Beitrag zur Abflußbildung und Grundwasserneubildung im paläozoischen  
Festgestein (Lange Bramke, Ostharz)  
TU Braunschweig, Inst. f. Geogr. u. Geoök., Dissertation 1990

SCHREIBER, D. (1989):

Hydrogeologische Studie Vorerkundung Bad Langensalza  
VEB Hydrogeologie Nordhausen, 1989 (unveröff.)

SCHULZE, J. (1980):

Das Standortmosaik von ausgewählten Talauen und Niederungen im Einzugsgebiet  
der oberen und mittleren Unstrut unter besonderer Berücksichtigung der  
Sedimenttypenverteilung. Dissertation Ernst-Moritz-Arndt-Universität, Greifswald,  
1980.

SCHULZE, J. (1992):

Genese, Verbreitung und Klassifizierung holozäner sulfatischer Sedimente in  
Talauen des inneren Thüringer Beckens.  
In: Billwitz, Jäger u. Janke (Hrsg.): Jungquartäre Landschaftsräume, Springer, Berlin,  
1992, S. 229-235.

SEIDEL, G. (1995) (Hrsg.):

Geologie von Thüringen  
E. Schweitzerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart 1995

SOMMER Th. u. KNOBLAUCH S. (1997):

Untersuchungen zur Grundwasser- und Stoffdynamik in Auen- und Talauensedimenten im Rahmen  
des Projektes "Revitalisierung der Unstrut- und Saale". Proceedings des Dresdner  
Grundwasserforschungszentrums 6: 173-187

SOMMER, Th.; HESSE, G.; LUCKNER, L.; BÜCHEL, G. (1999):

Grundwasserströmung und Stoffwanderung in Flußauen am Beispiel der Unstrut. In:  
Frieße u.a. (Hrsg.) "Stoffhaushalt von Auenökosystemen - Böden und Hydrologie,  
Schadstoffe, Bewertungen". Springer, 1999 (im Druck)

Staatliches Umweltamt Thüringen:

Zusammenstellung der Staatlichen Grundwassermeßstellen  
für die Meßtischblätter 4729, 4829, 4830, 4929

STEINMÜLLER, A. (1998):

Sedimentologie, stratigraphische Gliederung sowie Lagerungsformen der  
präglazialen Ablagerungen und zur Flußgeschichte von Helme und Unstrut im  
Auslagungsgebiet zwischen Kyffhäuser und Nebraer Pforte. In: Geowiss. Mitt. von  
Thüringen, Beiheft 7, Weimar 1998, S. 1 - 61

TLU (1994):

Grundwassermeßstellen in Thüringen. Verzeichnis und Karte. Schriftenr. d. Thüringer  
Landesanstalt für Umwelt, Jena 1994, 72 S.

TLU / TLG (1996):

Grundwasser in Thüringen, Bericht zu Menge und Beschaffenheit  
Thüringer Ministerium für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt (Hrsg.), Erfurt  
1996.

TREFFURT, D. (1982):

Ergebnisbericht mit Grundwasservorratsnachweis Dingelstedt  
VEB Hydrogeologie Nordhausen, 1982 (unveröff.)

WEßEL, K. u.a. (1999):

Forschungsvorhaben "Revitalisierung der Unstrut-Aue"  
Kurzfassung des Vortrages auf dem Statusseminar Elbe-Ökologie  
Berlin, 2. - 5. 11. 1999, Projektgruppe Elbe-Ökologie an der BfG (in Vorber.)

WITTKOWSKI (1995):

Revitalisierung Unstrutae Entwicklungskonzeption  
Karte 1 : 50.000

WuA (1999):

Aktuell: Stickstoff aus Gesteinsverwitterung beeinflusst Nitratgehalt der  
Fließgewässer. In: Wasser und Abfall, Heft 3, 1999, S. 7

ZIEGLER, G., GABRIEL, B. (1975):

Methodische Untersuchungen zur Bestimmung der Grundwasserneubildung im  
Festgesteinsbereich der Trias / Muschelkalk und Keuper  
Abschlußbericht, Institut für Wasserwirtschaft, AS Erfurt, 1975.